



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - 141584

ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN TEMPERING PADA PROSES HARDENING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL *HAMMER CRUSHER*

ARGYABRATA
02511440000109

DosenPembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TL 141584

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR
DAN WAKTU TAHAN *TEMPERING* PADA PROSES
HARDENING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN
STRUKTUR MIKRO MATERIAL *HAMMER
CRUSHER***

ARGYABRATA
02511440000109

Dosen Pembimbing
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc
Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TL 141584

**ANALYSIS THE EFFECT OF TEMPERATURE
TEMPERING AND HOLDING TIME TEMPERING
VARIATION IN HARDENING PROCESS ON
MECHANICAL PROPERTIES AND
MICROSTRUCTURE OF HAMMER CRUSHER
MATERIALS**

ARGYABRATA
02511440000109

Advisor
Ir. Rochman Rochiem, M.Sc.
Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc.

MATERIALS AND ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN
WAKTU TAHAN TEMPERING PADA PROSES
HARDENING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN
STRUKTUR MIKRO MATERIAL *HAMMER CRUSHER***

TUGAS AKHIR

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Korosi dan Analisis Kegagalan
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
ARGYABRATA
02511440000109

Disetujui oleh Dosen Pembimbing Tugas Akhir :

1. Ir. Rochman Rochiem, M.Sc. (Pembimbing 1)
2. Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc. (Pembimbing 2)



ANALISIS PENGARUH VARIASI TEMPERATUR DAN WAKTU TAHAN TEMPERING PADA PROSES HARDENING TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MIKRO MATERIAL *HAMMER CRUSHER*

Nama Mahasiswa : Argyabrata
NRP : 02511440000109
Jurusan : Teknik Material dan Metalurgi
Pembimbing : Ir. Rochman Rochiem. M.Sc.
Dian Mughni Fellicia ST., M.Sc

Abstrak

Clinker Cooler adalah salah satu peralatan yang memiliki fungsi sangat penting dalam industri semen. *Clinker cooler* berfungsi untuk mendinginkan terak (*clinker*) yang diproduksi oleh *kiln* sebelum terak diproses lagi sebagai bahan baku pembuat semen. Terak yang dihasilkan oleh *kiln* didinginkan di dalam *clinker cooler*, kemudian ukuran terak tersebut diperkecil dengan *hammer crusher* yang ada di dalam *clinker cooler*. Pada prosesnya, *hammer crusher* yang terdapat di *clinker cooler* mengalami keausan karena terus menerus mendapat beban berupa *clinker* yang ukurannya bermacam-macam pada temperatur operasi sekitar 100°C - 250°C. Material yang digunakan pada *hammer crusher* adalah *high chromium white cast iron*. Dalam penelitian ini, dilakukan analisis kegagalan dari *hammer crusher* dan solusi dari kegagalan tersebut berupa *hardening* dan *tempering*. Pengujian yang dilakukan adalah uji komposisi, uji kekerasan, uji keausan, dan metalografi. Berdasarkan uji komposisi OES dan uji kekerasan, yang menyebabkan kegagalan adalah kesalahan dalam komposisi material dan kekerasan material yang tidak sesuai standar ASTM. Solusi yang ditawarkan dari kegagalan ini yaitu perlakuan panas yang dapat menghasilkan kekerasan yang sesuai dengan standar kekerasan ASTM A532 berupa *hardening* pada temperatur 1000°C dan *tempering* dengan variasi temperatur *hardening* pada 200°C, 250°C, dan 300°C, serta variasi waktu tahan 2 jam dan 3

jam. Setelah diberi perlakuan panas, nilai kekerasan tertinggi terdapat pada spesimen dengan *hardening* dan *tempering* pada temperatur 200°C dengan waktu tahan 2 jam. Nilai kekerasan yang didapat adalah 699,6 HV, dengan laju keausan sebesar 1,67 mm/jam. Nilai kekerasan berbanding terbalik dengan laju keausan, yang menandakan laju keausan rendah memiliki ketahanan aus yang tinggi.

Kata kunci: *hammer crusher, high chromium white cast iron, hardening, tempering, ASTM A532*

**ANALYSIS THE EFFECT OF TEMPERATURE
TEMPERING AND HOLDING TIME TEMPERING
VARIATION IN HARDENING PROCESS ON
MECHANICAL PROPERTIES AND MICROSTRUCTURE
OF HAMMER CRUSHER MATERIAL**

Name : Argyabrata
NRP : 02511440000109
Major : Teknik Material dan Metalurgi
Advisor : Ir. Rochman Rochiem. M.Sc.
Dian Mughni Fellicia ST., M.Sc

Abstract

Clinker Cooler is one of the equipment that has a very important function in the cement industry. Clinker cooler has a function to cool the clinker produced by kiln before the slag is processed again as raw material of the cement. The slag produced by the kiln will be cooled in the clinker cooler, and then the size of the slag will be minimized by the hammer crusher in the clinker cooler. In the process, the hammer crusher placed in the clinker cooler is wearable because of continuous clinker loads of varying sizes at operating temperatures around 100°C - 250°C. The material used in hammer crusher is high chromium white cast iron. In this research, there is an investigation the cause of failure on hammer crusher and the solution of the failure in the form of hardening and tempering. The tests carried out are composition test, hardness test, wear test, metallography test, and abrasive test. Based on the composition test and hardness test, the factor causing the failure is the error on composition and hardness of material that is not fit with ASTM standard. The solution offered from this failure is heat treatment that can produce hardness in accordance with ASTM A532 hardness standard that is hardening and tempering with variation of hardening temperature at 200°C, 250°C, and 300°C, and variation of holding time at 1 hour and 2 hour each. After heat treatment, the highest hardness values were found in specimen with

hardening and tempering at 200°C with 2 hour holding time. The obtained hardness value is 699,6 HV, with wear rate equal to 1,67 mm / hour. The value of hardness is inversely proportional to the wear rate, which signifies the low wear rate has a high wear resistance.

Keywords: hammer crusher, high chromium white cast iron, hardening, tempering, ASTM A532

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat, anugerah, serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir serta menyusun laporan Tugas Akhir dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan Tempering pada Proses Hardening terhadap Sifat Kekerasan dan Struktur Mikro Material *Hammer Crusher*”. Laporan tugas akhir ini dibuat untuk melengkapi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu syarat kelulusan mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, laporan tugas akhir ini tidak dapat terselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada pihak yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan kesempatan kepada penulis hingga laporan tugas akhir ini dapat diselesaikan, diantaranya:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi.
2. Ir. Rochman Rochiem., M.Sc. dan Dian Mughni Felicia, S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Dr. Agung Purniawan, ST., M,Eng selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
4. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI- ITS.

5. Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., PhD. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
6. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
7. Rekan-rekan mahasiswa Teknik Material dan Metalurgi.
8. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

Penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi seluruh pihak yang membaca. Penulis juga menyadari masih terdapat banyak kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini, sehingga penulis sangat menerima kritik dan saran dari para pembaca yang dapat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.

Surabaya, 19 Desember 2017

Penulis,

Argyabrata
02511440000109

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
ABSTRAK	i
ABSTRACT	iii
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>Clinker Cooler</i>	5
2.2 <i>Hammer Crusher</i>	7
2.3 <i>Material Hammer Crusher (ASTM A532)</i>	8
2.4 Baja Paduan	10
2.4.1 Diagram Fasa Fe-Fe ₃ C	11
2.4.2 Diagram Fasa Fe – 18 % wt Cr – C	12
2.5 Besi Tuang (<i>Cast Iron</i>)	14
2.5.1 Besi Tuang Putih (<i>White Cast Iron</i>)	14
2.6 Analisa Kegagalan	17
2.7 Keausan	19
2.8 Metalografi	23
2.9 Pengujian Kekerasan	23
2.9.1 Uji Kekerasan Vickers	24
2.10 <i>Heat Treatment</i>	25
2.10.1 <i>Hardening</i>	26
2.10.2 <i>Austenitisasi</i>	27
2.10.3 <i>Quenching</i>	29
2.10.4 <i>Tempering</i>	32

2.11 Pengujian abrasif	34
2.12 Penelitian Sebelumnya	36
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Diagram Alir Penelitian	39
3.2 Metode Penelitian	40
3.3 Material yang Digunakan	41
3.4 Peralatan.....	42
3.5 Tahapan Penelitian	45
3.5.1 Review Dokumen Perusahaan.....	45
3.5.2 Preparasi Spesimen	45
3.5.3 Pengujian Komposisi	46
3.5.4 Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik	46
3.5.5 Pengujian Kekerasan.....	46
3.5.6 Proses Perlakuan Panas	47
3.6 Rancangan Penelitian.....	48
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisis Data.....	49
4.1.1 Analisis Data Material <i>Hammer Crusher</i>	50
4.1.2 Pengujian Komposisi	50
4.1.3 Hasil Pengamatan Makroskopik.....	51
4.1.4 Hasil Pengamatan Mikroskopik	52
4.1.5 Hasil Pengujian Kekerasan.....	52
4.1.6 Hasil Proses Pengerasan.....	53
4.1.7 Hasil Pengujian XRD.....	54
4.1.8 Hasil Pengujian Kekerasan.....	56
4.1.9 Hasil Pengamatan Mikroskopik	58
4.1.10 Hasil Pengujian Keausan.....	61
4.2 Pembahasan	62
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	xii
LAMPIRAN	xvii
UCAPAN TERIMA KASIH	xxxix
BIODATA PENULIS	xxxiii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen utama <i>clinker cooler</i>	6
Gambar 2.2	<i>Hammer Crusher</i>	8
Gambar 2.3	Diagram fasa Fe-Fe ₃ C.....	12
Gambar 2.4	Diagram Fasa Fe-18 % wt Cr-C.....	13
Gambar 2.5	Pengaruh kadar chromium terhadap luasan daerah austenit.....	13
Gambar 2.6	Struktur mikro besi tuang putih	26
Gambar 2.7	Keausan gesek.....	21
Gambar 2.8	Keausan abrasif	21
Gambar 2.9	Keausan lelah.....	22
Gambar 2.10	Uji <i>Vickers</i>	25
Gambar 2.11	Skema perlakuan panas pada <i>high chromium white cast iron</i>	27
Gambar 2.12	Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas	28
Gambar 2.13	Pengaruh temperatur austenitisasi pada sifat kekerasan dan jumlah austenite sisa pada <i>high chromium white cast iron</i>	29
Gambar 2.14	Tiga Tahapan pada <i>quenching</i>	30
Gambar 2.15	Diagram CCT untuk <i>class II white cast iron</i> .	31
Gambar 2.16	Perubahan fasa yang terjadi pada proses <i>tempering</i>	32
Gambar 2.17	Skema penggunaan <i>pin-on-disk</i>	34
Gambar 2.18	Alat uji keausan.....	35
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	37
Gambar 3.2	Komponen <i>hammer crusher</i>	39
Gambar 3.3	Mesin <i>Wire Cut</i>	40
Gambar 3.4	Kamera <i>Digital</i>	41
Gambar 3.5	Mesin uji <i>Optical Emission Spectroscopy</i>	42
Gambar 3.6	<i>Universal hardness tester</i>	42
Gambar 3.7	Mesin <i>pin-on-disk</i>	38
Gambar 3.8	Alat Uji mikroskop optik.....	38
Gambar 3.9	Skema proses <i>hardening</i> dan <i>tempering</i>	38

Gambar 4.1	<i>Hammer crusher assembly</i>	49
Gambar 4.2	Komponen <i>hammer crusher</i>	50
Gambar 4.3	Foto makroskopik material <i>hammer crusher</i>	51
Gambar 4.4	Struktur mikro material <i>hammer crusher</i> kondisi <i>as-cast</i>	52
Gambar 4.5	Titik indentasi uji kekerasan.....	53
Gambar 4.6	Grafik hasil pengujian XRD material <i>hammer crusher</i>	55
Gambar 4.7	Grafik hasil uji kekerasan material <i>hammer crusher</i>	57
Gambar 4.8	Struktur mikro material <i>hammer crusher</i> pada kondisi <i>as-quenched</i>	58
Gambar 4.9	Struktur mikro material <i>hammer crusher</i> pada berbagai kondisi <i>as-tempered</i> perbesaran 200x.....	59
Gambar 4.10	Struktur mikro material <i>hammer crusher</i> pada berbagai kondisi <i>as-tempered</i> perbesaran 500x.....	60
Gambar 4.11	Grafik Hasil Uji Keausan material <i>hammer crusher</i>	62

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Komposisi Kimia pada ASTM A532	9
Tabel 2.2 Sifat Mekanik pada ASTM A532.....	10
Tabel 2.3 Perbandingan kekerasan fasa yang terbentuk pada <i>high chromium white cast iron</i>	17
Tabel 3.1 Komposisi kimia <i>hammer crusher</i>	40
Tabel 3.2 Rancangan penelitian	46
Tabel 4.1 Data material <i>hammer crusher</i>	50
Tabel 4.2 Hasil uji kekerasan	54
Tabel 4.3 Kode penamaan perlakuan panas	54
Tabel 4.4 Hasil pengujian XRD material <i>hammer crusher</i>	56
Tabel 4.5 Hasil uji kekerasan material <i>hammer crusher</i> setelah perlakuan panas	57
Tabel 4.6 Perhitungan volume karbida	58
Tabel 4.7 Hasil pengujian keausan.....	61



BAB I PENDAHULUAN

I.1 Latar Belakang

PT. Semen Indonesia adalah salah satu produsen semen terbesar di Indonesia yang berhasil membangun pabrik Tuban IV dan Tonasa V, serta akuisisi perusahaan semen Vietnam Thang Long Cement Company pada akhir tahun 2013. PT. Semen Indonesia pada awal tahun 2013 sebagai perusahaan semen terbesar di Asia Tenggara berdasarkan kapasitas terpasang, yaitu 30 juta ton/tahun. Proses pembuatan semen PT. Semen Indonesia unit Tuban 3 secara garis besar melalui proses dengan dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan clinker, proses penggilingan semen dan *packing* semen. Dalam proses produksi semen ini, terdapat banyak *equipment* yang digunakan dan salah satunya adalah *clinker cooler*. (Ibrahim, 2004)

Secara umum, proses pembuatan semen di PT. Semen Indonesia dimulai dari pengambilan bahan baku, proses pembuatan terak (*clinker*), proses penggilingan semen (*milling*), penyimpanan dalam *silo*, dan pengemasan semen (*packing*). Proses pembuatan terak (*clinker*) terdiri dari pemanasan awal, pengeringan dalam *rotary kiln*, dan pendinginan (*Cooling*). (Ibrahim, 2004). Pada unit Tuban I dan II, terdapat proses pembuatan terak/*clinker*. Pada proses pembuatan terak(*clinker*) terdapat suatu proses pendinginan *clinker* oleh *Clinker Cooler*. *Clinker Cooler* merupakan salah satu komponen yang vital dalam industri semen. *Clinker cooler* berfungsi sebagai pendingin material yang keluar dari *kiln (clinker)* sehingga fungsinya sangat penting untuk kelangsungan produksi terak (*clinker*) di Pabrik Tuban Semen Indonesia. *Clinker* hasil dari *rotary kiln* didinginkan di dalam *clinker cooler*, kemudian *clinker* tersebut



diproses dengan *hammer crusher* yang ada di dalam *clinker cooler* untuk mengubah ukuran menjadi ukuran yang lebih kecil. Kemudian, clinker yang masih bertemperatur kurang lebih 100-250°C dibawa menggunakan *pan conveyor* menuju *silo*. *Clinker cooler* harus bekerja dengan optimal karena apabila terjadi masalah pada *clinker cooler*, maka akan mengganggu operasi lainnya seperti mengganggu operasi pada *rotary kiln* dan daerah *finish mill*. *Clinker cooler* membawa *clinker* dari *kiln* menuju *silo* secara terus-menerus. Proses ini sejalan dengan produksi terak pada *kiln*. Maka dari itu, jika *clinker cooler* mati, produksi *clinker* pada *kiln* mungkin dihentikan karena temperatur *clinker* yang dihasilkan sangat tinggi. Temperatur *clinker* yang tinggi berpotensi untuk merusak peralatan yang ada pada proses selanjutnya.

Clinker cooler ini baru beroperasi selama kurang lebih setahun dan merupakan hasil modifikasi dari *cooler* generasi sebelumnya. Pada tanggal 13 Mei 2017 *hammer crusher* pada *clinker cooler* mengalami keausan (*wear*) yang tidak wajar. Kerusakan *hammer crusher* mengakibatkan *clinker cooler* mengalami penurunan distribusi terak dan proses produksi semen mengalami penurunan hingga *hammer crusher* tersebut diganti dengan *part* yang baru. *Hammer crusher* pada PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk mengalami keausan yang seharusnya umur pakainya selama 6 bulan hanya bertahan selama 3 bulan. Dari kasus tersebut dilakukan analisis kegagalan dengan menguji komposisi dan kekerasan material *hammer crusher* yang ada di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk. Diperoleh komposisi yang tidak sesuai dengan material *hammer crusher*, serta nilai kekerasan yang tidak sesuai dengan standar yang ada, yaitu ASTM A532. Disisi lain, *hammer crusher* yang baru harus diganti secara keseluruhan. Sehingga hal ini dapat menambah



cost production sekaligus sangat menghambat proses produksi di PT. Semen Indonesia. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian untuk menganalisis kegagalan yang terjadi dan meminimalisir terjadinya keausan pada material *hammer crusher* yang ada di PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk dengan melakukan proses pengerasan (*hardening*) dan *tempering*. Setelah diberi perlakuan panas, diharapkan kita dapat mengetahui hasil proses *hardening* dan *tempering* dari penelitian ini, sebagai solusi kegagalan dari material *hammer crusher*.

I.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *tempering* pada proses *hardening* terhadap sifat kekerasan dan mikrostruktur *hammer crusher*?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur *tempering* pada proses *hardening* terhadap sifat kekerasan dan mikrostruktur *hammer crusher*?

I.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut :

1. Desain *hammer crusher* dianggap memenuhi standar operasional.
2. Material dianggap homogen di semua sisi
3. Diasumsikan tidak ada penurunan temperatur saat material uji keluar dari dapur pemanas.
4. Lama waktu pemindahan spesimen uji dari dapur ke media pendingin diasumsikan konstan pada semua spesimen uji.



I.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah :

1. Menganalisis pengaruh variasi temperatur *tempering* pada proses *hardening* terhadap sifat kekerasan dan mikrostruktur *hammer crusher*
2. Menganalisis pengaruh variasi waktu tahan *tempering* pada proses *hardening* terhadap sifat kekerasan dan mikrostruktur *hammer crusher*

I.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi penanganan bila terjadi kegagalan pada *hammer crusher* dikemudian hari dan dasar pengembangan pada penelitian-penelitian berikutnya.



BAB II

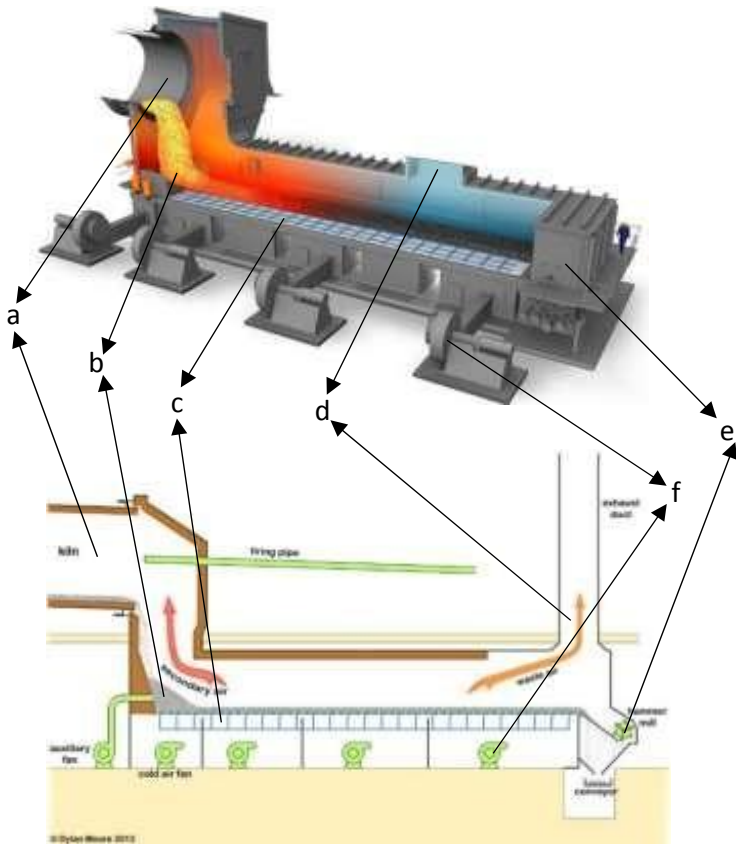
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Clinker Cooler*

Clinker yang sudah diproses dari awal sampai pada proses *rotary kiln* yang memiliki temperatur $\pm 1800^{\circ}\text{C}$ dan didinginkan hingga $\pm 1450^{\circ}\text{C}$ saat keluar dari *rotary kiln* dan terus didinginkan di *clinker cooler* menggunakan beberapa fan dan dikirim menggunakan *crossbar* sampai temperatur $\pm 100\text{--}250^{\circ}\text{C}$, untuk selanjutnya dihancurkan oleh *hammer crusher*.

Komponen utama dari *clinker cooler* ditunjukkan oleh Gambar 2.1. Proses pendinginan dimulai ketika (b) terak (*clinker*) yang keluar dari (a) *rotary kiln* kemudian dibawa oleh (c) *crossbar* menuju (e) *hammer crusher*. Di dalam *chamber-chamber*, terdapat (f) *fan* yang berada di bawah *crossbar* untuk mendinginkan *clinker* dengan cara meniupkan angin. Disamping itu, udara panas di dalam *clinker cooler* keluar melalui (d) *exhaust duct*, kemudian terak (*clinker*) di hancurkan oleh *hammer crusher* menjadi ukuran yang lebih kecil.

Pada *clinker cooler*, angin yang berasal dari *fan* dihembuskan melalui celah – celah landasan (*crossbar*) yang bergerak mengantarkan *clinker* dari *rotary kiln* menuju ke *hammer*. Untuk mendinginkan *clinker*, digunakan pula alat bernama *grate cooler*. Pada *grate cooler* proses pendinginan terak (*clinker*) dilakukan dengan mengalirkan udara dari sejumlah *fan*, yang selanjutnya dihembuskan melalui celah landasan (*grate*) yang bergerak mengantarkan terak (*clinker*) menuju ke *crusher* untuk proses selanjutnya. (Anwar, 2011).



Gambar 2. 1 Komponen utama *clinker cooler* (FLSmidth, 2016)

Luas permukaan efektif dari *clinker cooler* adalah 160.6 m² dan berkapasitas 7800 ton / hari. Terdapat 3 *section* pada *clinker cooler* yaitu *inlet*, *existing*, dan *extended*. (Firdaus, 2007). Proses pendinginan terak (*clinker*) di dalam *clinker cooler* merupakan salah satu proses yang cukup penting dalam industri semen. Hal ini disebabkan karena proses pendinginan terak



(*clinker*) setelah melewati pemanasan di dalam *rotary kiln*, merupakan salah satu faktor dalam upaya menghasilkan *clinker* dengan kualitas yang diharapkan. (Anwar, 2011)

2.2 Hammer Crusher

Hammer crusher adalah sebuah alat yang digunakan untuk memecah suatu material seperti batu ataupun *clinker*. *Hammer crusher* berbentuk seperti penggiling yang mempunyai *rotor* yang dapat berputar dan mempunyai alat pemecah berupa sebuah palu. Palu tersebut dipasang tergantung pada alat *hammer crusher*. Satu *hammer crusher* memiliki 3 set palu, dimana setiap set memiliki 7 palu yang berukuran sama besar. Gambar 2.2 menunjukkan komponen *hammer crusher*, (a) *rotor* yang berfungsi menggerakkan (b) *hammer crusher* dan (c) *hammer dies* yang berfungsi sebagai pemisah antara *hammer* satu dengan yang lainnya. Cara kerja dari *hammer crusher* yaitu, *hammer crusher* bergerak pada kecepatan tertentu kemudian menghancurkan *clinker* yang di transportasi oleh *crossbar* dari *rotary kiln*. Saat *clinker* dihancurkan, akan terjadi kontak antara ujung dari *hammer crusher* dengan *clinker*. Kontak yang terjadi terus menerus antara palu *hammer crusher* dan *clinker* dapat membuat material *hammer crusher* mengalami keausan. Pemeriksaan dan perawatan *hammer*/palu penting dan sangat dibutuhkan, karena berhubungan dengan mengubah palu yang dapat mempercepat tingkat putaran serta bergantung pada keras lunaknya obyek yang akan di giling. (Edahwati, 2009).



Gambar 2. 2 *Hammer Crusher* (FLSmith, 2016).

2.3 ASTM A532

Material *hammer crusher* yang seharusnya dan sesuai dengan standar yang ada yaitu besi tuang putih (*white cast iron*) yang sesuai dengan ASTM A532. Besi cor putih cocok sebagai aplikasi *grinding, milling, earth-handling, dan manufacturing industries*. Spesifikasi fasa yang terbentuk pada besi cor putih antara lain perlit, ledeburit dan sementit. Tabel 2.1 menunjukkan komposisi kimia besi cor putih pada ASTM A532 antara lain sebagai berikut :



Tabel 2. 1 Komposisi Kimia pada ASTM A532 (ASTM A532, 1999).

<i>Class</i>	<i>Type</i>	<i>Designation</i>	<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>N</i>	<i>Cr</i>	<i>Mo</i>	<i>Cu</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
I	A	Ni-Cr-Hc	2.8-3.6	2.0 max	0.8 max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	B	Ni-Cr-Lc	2.4-3.0	2.0 max	0.8 max	3.3-5.0	1.4-4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	C	Ni-Cr-GB	2.5-3.7	2.0 max	0.8 max	4.0 max	1.0-2.5	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	D	Ni-HiCr	2.5-3.6	2.0 max	2.0 max	4.5-5.7	7.0-11.0	1.5 max	...	0.10 max	0.15 max
II	A	12% Cr	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	11.0-14.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	B	15% Cr-Mo	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	14.0-18.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	D	20% Cr-Mo	2.0-3.3	2.0 max	1.0-2.2	2.5 max	18.0-23.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
III	A	25% Cr	2.0-3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	23.0-30.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max

Sifat mekanik dari ASTM A532 juga bermacam-macam, salah satunya adalah kekerasan pada tiap kelas dan tipe dari material yang berbeda – beda. Tabel 2.2 menunjukkan macam-macam nilai kekerasan pada ASTM A532. (ASTM A532, 1999).



Tabel 2. 2 Sifat Mekanik pada ASTM A532
(ASTM A532, 1999).

Class	Type	Designation	As-cast or as-cast and Stress Relieved		Hardened or Hardened and Stress Relieved					
					Level 1			Level 2		
			HB	HRC	HV	HB	HR C	HV	HB	HR C
I	A	Ni-Cr-HiC	550	53	600	600	56	660	650	59
I	B	Ni-Cr-LoC	550	53	600	600	56	660	650	59
I	C	Ni-Cr-GB	550	53	600	600	56	660	650	59
I	D	Ni-HiCr	500	50	540	600	56	660	650	59
II	A	12 % Cr	550	53	600	600	56	660	650	59
II	B	15 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59
II	D	20 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59
III	A	25 % Cr	450	46	485	600	56	660	650	59

2.4. Baja Paduan

Baja adalah paduan besi dan karbon yang mungkin mengandung unsur paduan lainnya; ada banyak jenis paduan yang memiliki komposisi dan perlakuan panas yang berbeda. Sifat mekanik sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon, yang biasanya kurang dari 2,0 wt%. Pada umumnya baja diklasifikasikan menurut persentase karbon yaitu karbon rendah, menengah, dan tinggi. Selain itu juga dapat dikelompokkan berdasarkan kandungan unsur paduannya. Baja karbon biasa (plain carbon steel) yang hanya berisi konsentrasi karbon dan baja selain itu memiliki sedikit pengotor dan sedikit paduan manganese. Untuk baja paduan, unsur paduan ditambahkan untuk tujuan tertentu dengan konsentrasi tertentu. (Callister, 2007).



II.4.1 Diagram Fasa Fe-Fe₃C

Dalam besi cair karbon dapat larut, tetapi dalam keadaan padat kelarutan karbon dalam besi akan terbatas. Selain sebagai larutan padat, besi dan karbon juga dapat membentuk senyawa *interstisial* (*interstitial compound*), eutektik dan juga eutektoid, atau mungkin juga karbon akan terpisah (sebagai grafit). Karena itu diagram fasa besi-karbon ada 2 macam, diagram fasa besi – karbida besi dan diagram fasa besi – grafit. Diagram keseimbangan besi – karbon cukup kompleks, tetapi hanya sebagian saja yang penting bagi dunia teknik, yaitu bagian antara besi murni sampai senyawa *interstitial*nya, karbida besi Fe₃C, yang mengandung 6,67 %C. dan diagram fasa yang banyak digunakan adalah diagram fasa besi – karbida besi, diagram Fe–Fe₃C.

Pada keadaan yang benar-benar ekuilibrium karbon akan berupa karbon bebas (grafit), sehingga akan diperoleh diagram kesetimbangan besi-grafit. Perubahan–perubahan dalam keadaan ekuilibrium berlangsung terlalu lama. Seharusnya karbida besi akan terjadi pada temperatur kamar (pada temperatur sekitar 700°C pun perubahan ini akan makan waktu bertahun-tahun). Dalam hal ini karbida besi dikatakan sebagai suatu struktur yang metastabil. Diagram fasa Fe–Fe₃C dapat dilihat pada Gambar 2.3. (Avner, 1997)

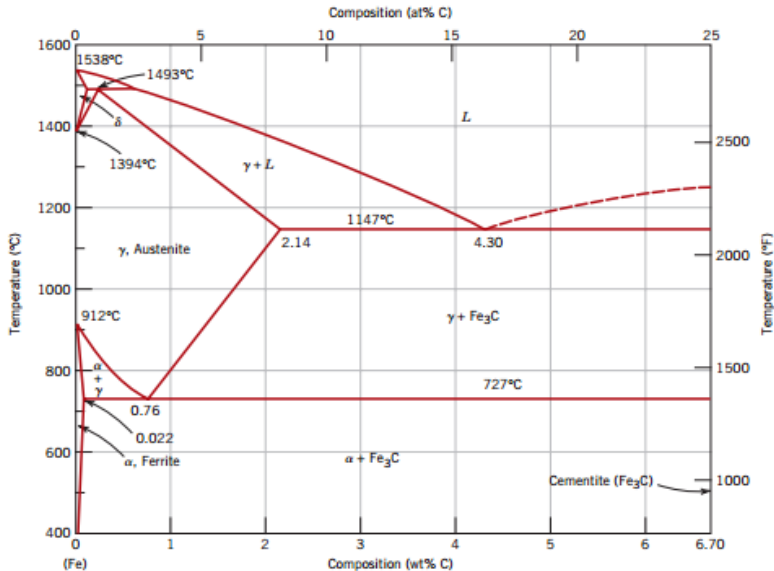
Dari Gambar 2.4. tampak bahwa diagram fasa ini memiliki tiga garis mendatar yang menandakan adanya reaksi yang berlangsung secara *isothermal*, yaitu :

- Pada 1496⁰C, kadar karbon antara 0.10 – 0.50 %, berlangsung reaksi peritektik. $L + \delta \rightarrow \gamma$ (daerah ini tidak begitu penting untuk dunia teknik)
- Pada 1130⁰C, kadar karbon antara 2,0 – 6,67 %,



berlangsung reaksi eutektik. $L \rightarrow \gamma + \text{Fe}_3\text{C}$

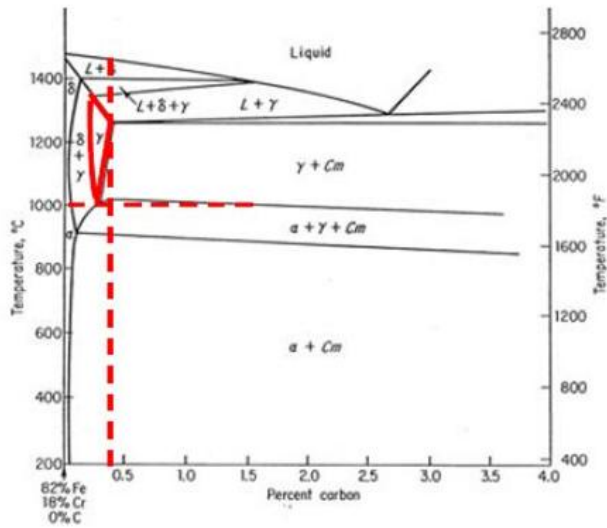
- Pada 723°C , kadar karbon antara 0.025 – 6.67 %, berlangsung reaksi eutectoid. $\Gamma \rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$



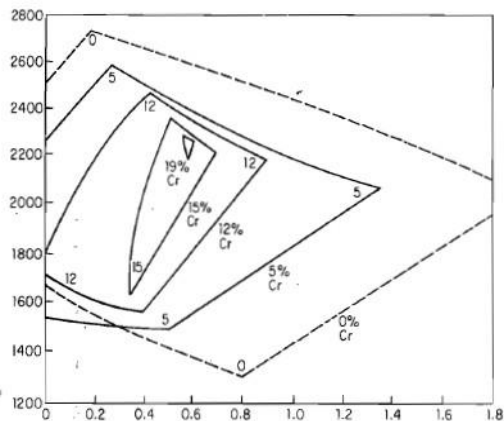
Gambar 2.3 Diagram fasa Fe - Fe₃C (Callister, 1997).

2.4.2 Diagram Fasa Fe – 18 % wt Cr – C

Diagram Fasa Fe – 18 % wt Cr – C dapat dilihat pada gambar 2.4. Cr merupakan unsur penstabil ferit. Unsur paduan penstabil ferrit akan memperluas daerah ferrit dan memperkecil daerah austenit, ini digambarkan dengan makin sempitnya daerah austenit dari baja dengan kadar karbon kromium yang makin tinggi seperti pada Gambar 2.5. (Avner, 1997).



Gambar 2.4. Diagram Fasa Fe – 18 % wt Cr – C.



Gambar 2.5. Pengaruh kadar chromium terhadap luasan daerah austenite (Avner, 1997).



2.5 Besi Tuang (*Cast Iron*)

Besi tuang adalah paduan besi dan karbon dengan kandungan karbon berkisar antara 2,0-6,67%, namun yang biasa digunakan untuk berbagai komponen mesin mempunyai kandungan karbon 2,5-4,0 %. Unsur-unsur ini menjadikan sifat fisis/mekanis besi tuang berbedabeda. Kadar karbon yang tinggi mengakibatkan besi tuang bersifat rapuh dan tidak dapat ditempa. (Nukman, 2002). Dasar pengklasifikasian besi cor ditentukan oleh struktur metalografi yang sangat dipengaruhi oleh kandungan karbon dalam paduan. Karbon dapat berupa sementit (Fe_3C) ataupun karbon bebas (grafit). Bentuk, ukuran dan distribusi grafit akan mempengaruhi sifat mekanik besi cor. Unsur lain berupa silikon, mangan, phosphor dan belerang juga mempengaruhi struktur metalografi besi cor. (Lilik, 2015). Pengelompokan besi cor berdasarkan struktur mikro khususnya bentuk karbon dibagi dalam empat golongan yaitu: besi cor putih, besi cor mampu tempa (*malleable cast iron*), besi cor kelabu (*grey cast iron*), dan besi cor nodular (*nodular cast iron*). (Avner, 1997).

2.5.1 Besi Tuang Putih (*White Cast Iron*)

Struktur karbida diperoleh dengan menjaga kandungan karbon (2,0-3,0%) dan silikon (0,5-1,5%) pada kadar rendah dan kecepatan pembekuan yang tinggi pada proses solidifikasi. Diberi nama putih karena patahannya berwarna putih. Memiliki struktur karbida (*cementite*) di dalam matriks *pearlite*. Keras, getas, dan tidak dapat dimesin. Memiliki ketahanan terhadap keausan (*wear resistance*) dan abrasi sangat baik. Karbida-karbida utama dalam struktur mikro besi tuang putih memberikan kekerasan yang sangat tinggi yang diperlukan untuk memecahkan (*crushing*) dan menghancurkan (*grinding*) material



lain tanpa terjadinya degradasi. Dukungan struktur matriks yang diatur oleh unsur paduan atau heat treatment menjaga keseimbangan antara ketahanannya terhadap keausan abrasi dan ketangguhan yang diperlukan untuk menanggung beban impak. Besi tuang putih paduan tinggi siap di cetak dalam berbagai bentuk yang diperlukan untuk memecahkan dan menghancurkan atau menangani material abrasive. (Walton, 1996). Besi tuang putih merupakan paduan hypoeutektik dimana setelah penuangan dan membeku, karbon akan bercampur dengan besi membentuk sementit (Avner, 1997). Besi tuang putih mengandung sejumlah besar sementit sebagai jaringan kerja dalam dendrit yang berkesinambungan menyebabkan besi tuang putih menjadi keras, tahan panas dan aus tetapi sangat rapuh dan sukar dikerjakan dengan mesin (Callister, 1997).



Gambar 2.6 Struktur Mikro Besi Tuang Putih (Callister, 1997).



High chromium white cast iron biasanya digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan abrasi. Dalam beberapa aplikasi material ini juga diharapkan mampu menahan beban impak yang tinggi. Mikrostruktur dari besi tuang putih dapat dilihat pada Gambar 2.6. Berdasarkan kandungan karbon dan kromium, maka struktur mikro dari *high chromium white cast iron* dikelompokkan menjadi tiga jenis, yaitu: *eutectic alloys*, *hypoeutectic alloys*, dan *hypereutectic alloys* (Nurjaman, 2012). Material *hammer* yang mengalami kegagalan termasuk dalam kelompok *high chromium white cast iron* dengan kandungan karbon sebanyak 1.73% dan Cr sebanyak 17%, sehingga termasuk dalam kelompok *hypoeutectic alloys*. Struktur *hypoeutectic alloys*, kandungan karbon lebih rendah dari titik eutektik. Proses solidifikasi diawali dengan pembentukan dendrit dari matriks (austenit) pada rentang temperatur solidifikasi tertentu hingga mencapai temperatur eutektik. Kemudian proses berlanjut dengan pembentukan struktur eutektik. (Nurjaman, 2012). Walaupun sementit secara otomatis hilang karena tingginya kadar kromium pada *high chromium white cast iron*, sejumlah sementit masih mungkin untuk terbentuk (Cobos, et al, 2015). Salah satu sifat mekanik yang dipengaruhi oleh fasa yang terbentuk pada *high chromium white cast irons* adalah kekerasan. Tabel 2.5 berikut menunjukkan perbandingan kekerasan dari setiap fasa pada *high chromium white cast irons* .



Tabel 2.3 Perbandingan Kekerasan Fasa yang Terbentuk pada *High Chromium White Cast Iron* (Kopycinski, 2014; Wiengmoon, 2011).

Fasa	Struktur Kristal	Nilai Kekerasan (HV)
Austenit	FCC	210
Perlit	-	265
Martensit	Tetragonal	940
Bainit	-	660
M3C	Ortorombik	800-1100
M6C	FCC	1200-1800
M7C3	Hexagonal	1000-1800
M23C6	FCC	1000

Karbida pada *high chromium white cast irons* sangat keras, getas, dan memiliki ketahanan aus yang baik. Secara umum ketahanan aus dapat ditingkatkan dengan menambahkan jumlah karbida (menambahkan komposisi karbon), sedangkan ketangguhan dapat ditingkatkan dengan meningkatkan jumlah *metallic matrix* (mengurangi komposisi karbon). (*ASM Handbook Vol. 4, 1991*).

2.6 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan adalah suatu pemeriksaan terhadap komponen-komponen atau struktur yang bekerja tidak sebagaimana mestinya atau mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan tersebut terjadi. Tujuan utama dari analisa kegagalan adalah untuk mengetahui mekanisme terjadinya kegagalan dan memberikan solusi-solusi



yang dapat dilakukan untuk mengatasi masalah kegagalan tersebut. Analisa kegagalan dilakukan untuk mengintegrasikan analisa yang dilakukan terhadap bukti dengan pemahaman secara kuantitatif terhadap latar belakang informasi pada tahap perancangan, proses manufaktur, dan sejarah penggunaan dari produk atau sistem yang gagal. (Duddy, 2016).

Analisa kegagalan dilakukan dengan observasi pada komponen-komponen atau struktur yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan. Maka dari itu, pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Pengujian mekanik juga diperlukan, karena umumnya kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

Umumnya, suatu komponen dapat dipertimbangkan mengalami kegagalan jika komponen tersebut tidak berfungsi sesuai dengan yang diharapkan secara efisien. Bentuk umum kegagalan mekanik adalah sebagai berikut:

1. *Yielding* komponen akibat pembebanan statik. *Yielding* yang terjadi menyebabkan deformasi plastis yang mungkin diakibatkan oleh kondisi *misalignment* atau terjadinya gangguan pada pergerakan mekanik.
2. *Buckling*, yang terjadi pada struktur kolom ramping pada saat menerima beban tekan, atau pada pipa berdinding tipis pada saat menerima beban torsi.
3. *Creep failure*, yang terjadi pada saat *creep strain* melebihi toleransi yang diijinkan dan menyebabkan interferensi diantara komponen. Pada kasus yang sangat ekstrim, kegagalan terjadi melalui *rupture* yang terjadi pada komponen yang



- mengalami *creep*.
4. *Wear failure*, yang dapat terjadi pada komponen dimana mengalami gerakan relatif satu sama lainnya. Keausan yang berlebihan dapat mengakibatkan kelonggaran bantalan menjadi di luar toleransi yang diijinkan dan gerakan menjadi tidak teliti. Jenis *wear failure* yang lainnya adalah *galling* dan *seizure* pada komponen.
 5. *Fracture failure* yang diakibatkan pembebanan statis berlebih. Jenis kegagalan ini dapat dipertimbangkan sebagai tingkat akhir dari kegagalan akibat *yielding*. Kegagalan dapat terjadi pada material ulet dan getas.
 6. *Fatigue fracture* akibat tegangan berlebih, cacat pada material, atau tegangan yang naik. Biasanya kegagalan jenis ini terjadi secara tiba-tiba tanpa gejala visual yang tampak.
 7. Kegagalan disebabkan efek kombinasi tegangan dan korosi, yang umumnya terjadi melalui *fracture* yang diawali dengan retak pada titik konsentrasi tegangan. Sebagai contoh *caustic cracking* di sekitar lubang rivet pada boiler.
 8. *Fracture* karena beban kejut, yang umumnya terjadi melalui pecah/belah pada material getas. Sebagai contoh pada baja di bawah transisi temperatur getas-ulet, dan pada plastik di bawah temperatur transisi kaca.

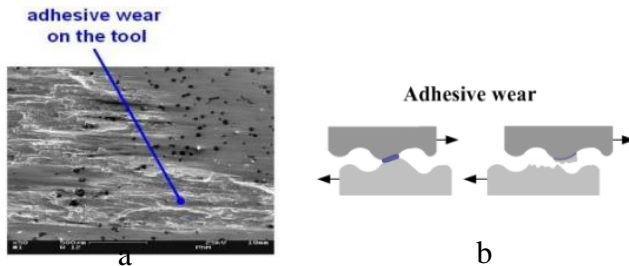
II.7 Keausan

Keausan adalah hilangnya bagian dari permukaan yang saling berinteraksi yang terjadi sebagai hasil gerak relatif pada permukaan. Keausan yang terjadi pada suatu material disebabkan oleh adanya beberapa mekanisme yang berbeda dan terbentuk oleh beberapa parameter yang bervariasi meliputi bahan,



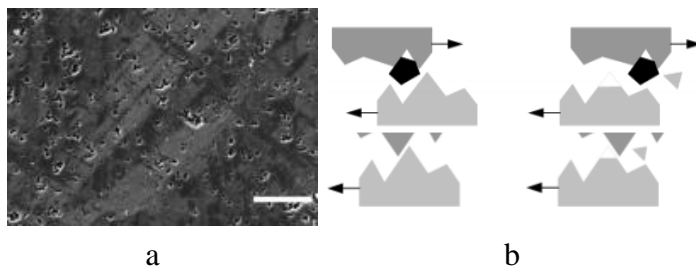
lingkungan, kondisi operasi, dan geometri permukaan benda yang terjadi keausan. Mekanisme keausan dikelompokkan menjadi dua kelompok, yaitu keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku mekanis dari bahan dan keausan yang penyebabnya didominasi oleh perilaku kimia dari bahan. Faktor-faktor yang mempengaruhi keausan adalah kecepatan, tekanan, kekasaran permukaan dan kekerasan bahan. Semakin besar kecepatan relative benda yang bergesekan, maka material semakin mudah aus. Demikian pula semakin besar tekanan pada permukaan benda yang berkontak, material akan cepat aus, begitu pula sebaliknya. Keausan yang mengakibatkan berkurangnya material-material pada benda akan menyebabkan kerusakan pada benda tersebut. (Dwi, 2012). Proses keausan dibagi menjadi 4, yaitu:

1. Keausan gesek (sliding wear, Adhesive wear)
Keausan gesek terjadi jika dua permukaan benda saling berkontak dan bergerak relatif satu sama lain serta mengalami pembebanan. Kontak permukaan dari kedua material tersebut mengakibatkan adanya perlekatan (adhesive) serta mengakibatkan deformasi plastis. Hingga pada akhirnya terjadi pengikatan (bonding) sebagian kecil permukaan material yang satu oleh material yang lain. Gambar 2.7 menunjukkan mikroskopik suatu material karena keausan lelah dan mekanisme keausan gesek.



Gambar 2.7 Keausan gesek. (a). Pengamatan micrographs keausan gesek. (b). Mekanisme Keausan Gesek (Endah, 2016).

2. Keausan Abrasi (Abrasive wear) Keausan Abrasi terjadi jika partikel abrasif yang kasar dan keras berkontak dengan permukaan suatu material yang lebih lunak sehingga terjadi pemotongan material yang lebih lunak. Gambar 2.8 menunjukkan mikroskopik suatu material karena keausan abrasi dan mekanisme keausan abrasi.

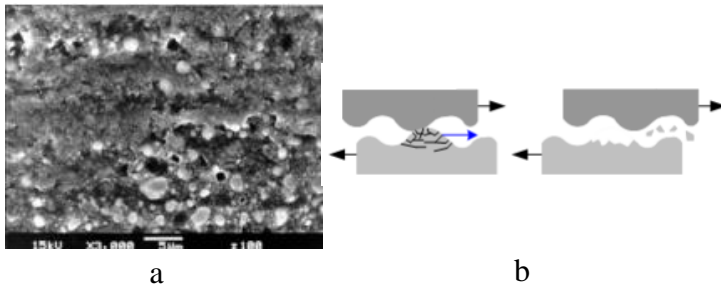


Gambar 2.8 Keausan abrasif (a). Pengamatan Micrographs Keausan Abrasi. (b). Mekanisme Keausan Abrasif (Endah, 2016).

3. Keausan leleh. Keausan leleh merupakan mekanisme



yang relatif berbeda dibandingkan dengan dua mekanisme sebelumnya, yaitu dalam hal interaksi permukaan. Baik keausan adesif maupun abrasif melibatkan hanya satu interaksi, sementara pada keausan lelah dibutuhkan multi interaksi. Keausan lelah dibagi menjadi dua fenomena penting, yaitu makroskopik dan mikroskopik. Keausan lelah makroskopik terjadi jika beban tidak tepat pada permukaan material, seperti pada rolling contact. Sedangkan Keausan lelah mikroskopik terjadi antara dua material yang bergerak *sliding*. Keausan ini terjadi akibat interaksi permukaan dimana permukaan yang mengalami beban berulang akan mengarah pada pembentukan retak-retak mikro. Retak-retak mikro tersebut pada akhirnya menyatu dan menghasilkan pengelupasan material. Gambar 2.9 menunjukkan mikroskopik suatu material karena keausan lelah dan mekanisme keausan lelah.



Gambar 2.9. Keausan lelah (a). Mikroskopik Suatu Material Karena Keausan Lelah. (b). Mekanisme Keausan Lelah (Endah, 2016).

4. Keausan korosi Proses kerusakan dimulai dengan adanya perubahan kimiawi material di permukaan oleh factor lingkungan. Kontak dengan lingkungan ini menghasilkan pembentukan lapisan pada permukaan dengan sifat yang berbeda



dengan material induk. Sebagai konsekuensinya, material akan mengarah kepada perpatahan interface antara lapisan permukaan dan material induk dan akhirnya seluruh lapisan permukaan itu akan tercabut.

II.8 Metalografi

Pengujian metalografi ini bertujuan untuk mengetahui fasa, bentuk dan ukuran struktur mikro. Selain itu juga untuk memprediksikan mikrostruktur yang terbentuk setelah proses perlakuan panas. Pengujian ini menggunakan standar ASTM E3 dengan tahapan sebagai berikut ini:

a. Tahap persiapan

- **Cutting:** Pemotongan spesimen dilakukan dengan menggunakan gergaji mesin/manual.
- **Mounting:** Membuat pegangan untuk mempermudah pemegangan spesimen saat proses grinding.
- **Grinding:** Menggosok spesimen dengan amplas silikon karbida mulai dari grade 60 hingga 2000. Sehingga akan di peroleh permukaan yang halus.
- **Polishing:** Memoles spesimen dengan pasta alumina dengan tujuan untuk memastikan tidak ada goresan pada permukaan.
- **Etching:** Mencelupkan permukaan spesimen kedalam larutan etsa. Larutan etsa yang di gunakan adalah nital dan pikral.

b. Tahap pengamatan

Tahap pengamatan dilakukan untuk mengamati struktur mikro dengan menggunakan mikroskop optik. Pengamatan dilakukan dengan beberapa kali perbesaran.

2.9 Pengujian Kekerasan

Kekerasan adalah salah satu sifat mekanik dari suatu



material. Kekerasan suatu material merupakan ketahanan material terhadap gaya penekanan atau deformasi dari material lain yang lebih keras. Yang menjadi prinsip dalam suatu uji kekerasan adalah terletak pada permukaan material pada saat permukaan material tersebut diberi perlakuan penekanan sesuai dengan parameter (diameter, beban, dan waktu). Pengujian yang banyak dipakai adalah dengan cara menekankan penekanan tertentu kepada benda uji dengan beban tertentu dan mengukur bekas hasil penekanan yang terbentuk diatasnya (Rahardjo,2010). Berdasarkan mekanisme penekanan yang dilakukan pada saat proses pengujian, uji kekerasan dapat dibedakan menjadi tiga jenis metode pengujian dalam menentukan kekerasan suatu material, yaitu *Brinell*, *Rockwell*, dan *Vickers*. Kekerasan dari besi cor umumnya cukup tinggi, sehingga untuk mendapatkan hasil yang maksimum, maka metode pengujian kekerasan yang cocok adalah dengan menggunakan *Brinell Hardness Testing*. (Murtiono, 2012).

2.9.1 Uji Kekerasan Vickers

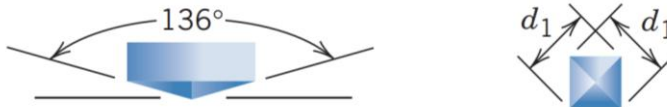
Metode Vickers ini berdasarkan pada penekanan oleh suatu gaya tekan tertentu oleh sebuah indenter berupa pyramid diamond terbalik dengan sudut puncak 136° ke permukaan logam yang akan diuji kekerasannya, dimana permukaan logam yang diuji ini harus rata dan bersih. Angka kekerasan Vikers (VHN) didefinisikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan (Dieter, 1996). Pengujian Vikers dapat dilakukan tidak hanya pada benda yang lunak akan tetapi juga dapat dilakukan pada bahan yang keras. Bekas penekanan yang kecil pada pengujian Vikers mengakibatkan kerusakan bahan percobaan relatif sedikit. Uji kekerasan Vickers banyak dilakukan pada pekerjaan penelitian, karena metode tersebut memberikan hasil berupa skala kekerasan yang kontinu, untuk suatu beban tertentu



dan digunakan pada logam yang sangat lunak, yakni DPH-nya 5 hingga logam yang sangat keras dengan DPH 1500. Prinsip pengukuran untuk kekerasan mikro vikers dapat dilihat pada Gambar 2.10. Pada prakteknya luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$\text{VHN} = \frac{2P \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)}{L^2} = \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan: P = Beban yang digunakan (kg) L = Panjang diagonal rata-rata (mm) θ = sudut antara permukaan intan yang berlawanan = 136°



Gambar 2.10 Uji Vickers (Callister, 2007).

2.10 Heat Treatment

Sifat mekanik tidak hanya tergantung pada komposisi kimia suatu paduan, tetapi juga tergantung pada struktur mikronya. Suatu paduan dengan komposisi kimia yang sama dapat memiliki struktur mikro yang berbeda sehingga sifat mekaniknya juga akan berbeda. Struktur mikro tergantung pada proses pengerjaan yang dialami, terutama proses perlakuan panas yang diterima selama proses pengerjaan. Proses perlakuan panas adalah kombinasi dari operasi pemanasan dan pendinginan dengan kecepatan tertentu yang dilakukan terhadap logam atau paduan dalam keadaan padat, untuk memperoleh sifat-sifat tertentu (ASM Metals Handbook, 1998).



Secara umum proses perlakuan panas diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu perlakuan panas yang mendekati kesetimbangan (near equilibrium) dan perlakuan panas yang tidak setimbang (non equilibrium). Perlakuan panas jenis near equilibrium secara umum bertujuan untuk untuk melunakkan struktur kristal, menghaluskan butir, menghilangkan tegangan dalam dan memperbaiki machineability. Jenis dari perlakuan ini misalnya full annealing, stress relief annealing, spheroidizing annealing dan normalizing. Perlakuan panas jenis non equilibrium secara umum bertujuan untuk mendapatkan kekerasan dan kekuatan yang lebih tinggi. Jenis perlakuan ini misalnya hardening, martempering, austempering dan surface hardening (Krauss, 2005).

2.10.1 Hardening

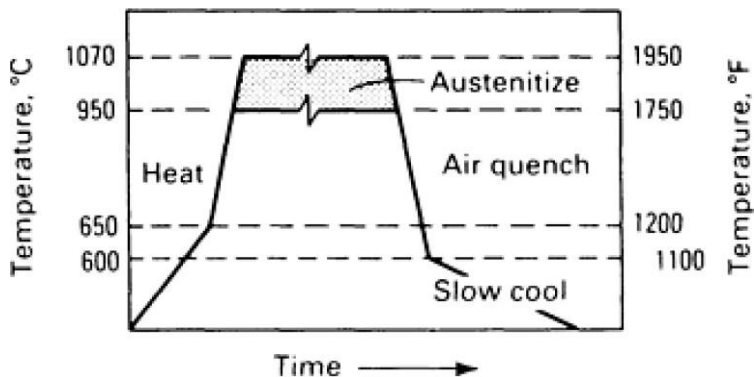
Hardening adalah proses perlakuan panas dengan mendinginkan logam secara cepat kedalam media pendingin dari temperatur austenitisasi atau perlakuan larutan (*solution treating*), pada umumnya pada rentang 815-870°C. Pada baja tahan karat dan baja paduan tinggi perlakuan *hardening* untuk meminimalisasi adanya karbida pada batas butir atau untuk meningkatkan distribusiferit tetapi pada baja karbon, paduan rendah, dan perkakas, *hardening* digunakan untuk mengontrol jumlah martensit yang terbentuk pada struktur mikro.

Proses perlakuan *hardening* dilakukan dengan memanaskan baja hingga mencapai temperatur austenitisasi, ditahan beberapa waktu tertentu pada temperatur tersebut, lalu didinginkan dengan cepat ke dalam media pendingin (*quenching*), sehingga diperoleh martensit. Pada suatu benda kerja yang dikeraskan maka kekerasan yang terjadi akan tergantung pada seberapa banyak martensit yang terbentuk dan kekerasan martensit itu sendiri. Banyaknya martensit yang terjadi tergantung pada seberapa banyak austenit yang terjadi pada saat pemanasan dan seberapa cepat pendinginannya sedangkan kekerasan martensit tergantung pada kadar karbon dalam baja yang terlarut dalam austenit. Beberapa hal yang



mempengaruhi kekerasan setelah proses pengerasan diantaranya temperatur austenitisasi, waktu tahan austenitiasi, laju pendinginan, kondisi permukaan benda kerja, ukuran/berat benda kerja yang dikeraskan, dan *hardenability* baja. (Avner, 1997).

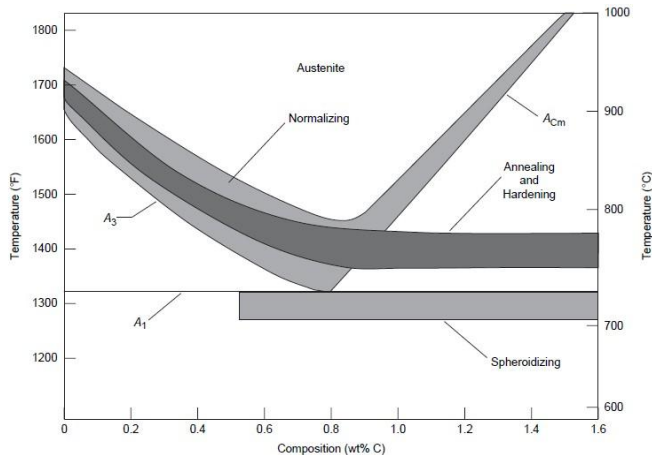
Pada *high chromium white cast irons*, performa optimal dapat didapatkan dengan pembentukan struktur martensit setelah perlakuan panas. Namun, pendinginan yang terlalu cepat tidak disarankan karena dapat menimbulkan *cracks* akibat dari tingginya *thermal stress*. Sifat ketangguhan dan ketahanan abrasi dapat ditingkatkan dengan perlakuan panas membentuk struktur martensit. Gambar 2.11 mengilustrasikan proses perlakuan pana untuk *high chromium white cast iron*.



Gambar 2.11 Gambar skema perlakuan panas pada *high chromium white cast iron*.

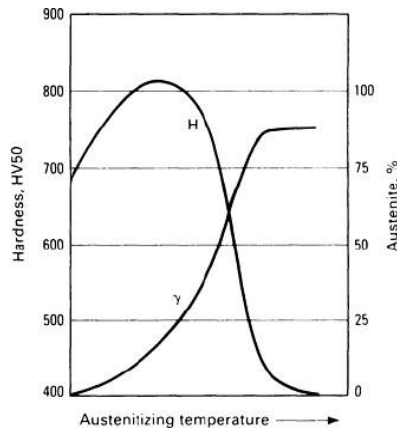
2.10.2 Austenitisasi

Pada proses austenitisasi, baja dipanaskan sampai daerah austenit (γ). Lalu, baja ditahan selama beberapa waktu tertentu sehingga karbida larut dan larutan padat austenite terbentuk. Temperatur yang dibutuhkan untuk melakukan austenitisasi pada kadar karbon tertentu seperti pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Rentang temperatur austenitisasi pada perlakuan panas (Campbell, 2008).

Peningkatan kadar karbon, temperatur berkurang sepanjang garis A_3 sampai mencapai minimum pada A_1 , komposisi eutektoid (0,8%), dan kemudian meningkat sepanjang garis A_{cm} . Tahap awal pembentukan austenit adalah nukleasi dan pertumbuhan austenit dari perlit (ferit+Fe₃C). Peningkatan temperatur dan kehausan partikel karbida awal dapat meningkatkan pembentukan austenit yang homogen. Namun, temperatur austenitisasi harus dijaga pada temperatur serendah mungkin agar risiko retak dan distorsi, oksidas, dekarburisasi, dan pertumbuhan butir bisa diminimalisir (Campbell, 2008). Temperatur yang dibutuhkan untuk mencapai 100% austenit pada baja *hypereutektoid* cukup tinggi, namun austenit untuk pengerasan pada baja dapat diperoleh pada temperatur sekitar 770°C. Karbida yang tidak terlarut dalam jumlah kecil memiliki pengaruh yang kecil pada sifat mekanik akhir baja.



Gambar 2.13 Pengaruh temperatur austenitisasi pada sifat kekerasan dan jumlah austenite sisa pada *high chromium white cast iron* (ASM Handbook Vol.4, 1991)

Terdapat temperature austenisasi yang optimal untuk mendapatkan kekerasan maksimal, yang bervariasi pada komposisi berbeda. Temperatur austenisasi menentukan jumlah karbon yang masih ada pada matriks austenit. Semakin tinggi temperatur akan meningkatkan stabilitas austenit, dan semakin banyak austenite sisa akan mengurangi sifat kekerasan. Sedangkan temperatur austenisasi yang terlalu rendah juga akan menurunkan kekerasan. Proses *heat treatment* yang berhasil dapat menciptakan destabilisasi austenite oleh presipitasi karbida M_7C_3 didalam matriks austenit, seperti pada gambar 2.13.

2.10.3 Quenching

Dalam proses pendinginan cepat, baja mengalami pendinginan cepat dari temperatur tinggi yang umumnya dilakukan dengan mencelupkan kedalam air atau minyak. Sebagai hasilnya diperoleh produk yang memiliki mikrostruktur yang dikeraskan (as-quenched) pada daerah kritis dan sifat mekanis yang memenuhi spesifikasi setelah proses temper.

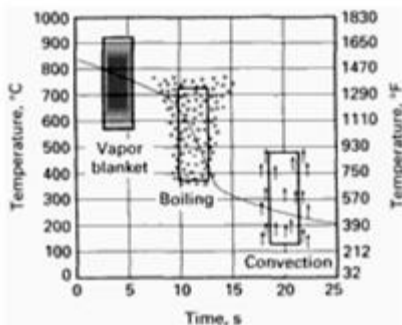


Keefektifan quenching tergantung pada sifat pendinginan dari media quench dan juga kemampukerasan dari baja.

Beberapa faktor yang terlibat dalam mekanisme pendinginan cepat, yaitu

- Kondisi internal bahan yang mempengaruhi proses perpindahan panas
- Kondisi permukaan yang mempengaruhi pelepasan panas
- Kemampuan penyerapan panas dari media quench dalam kondisi fluida tak mengalir pada temperatur dan tekanan fluida normal (kondisi standar)
- Perubahan kemampuan penyerapan panas dari fluida yang disebabkan oleh kondisi non-standar xedari agitasi, temperatur, dan tekanan. (Smith, J.L., Russel, G.M., & Bhatia, S.C, 2009).

Untuk menggambarkan mekanisme pendinginan cepat digunakan suatu kurva pendinginan yang dibuat berdasarkan pengujian pada kondisi aktual. Hasil kurva waktu terhadap temperatur dapat mengindikasikan karakteristik transfer panas dari media quench. Pada proses pendinginan cepat terjadi beberapa tahapan seperti pada Gambar 2.14. Sedangkan Gambar 2.15 menunjukkan CCT diagram untuk *high chromium white cast iron* kelas IIE.



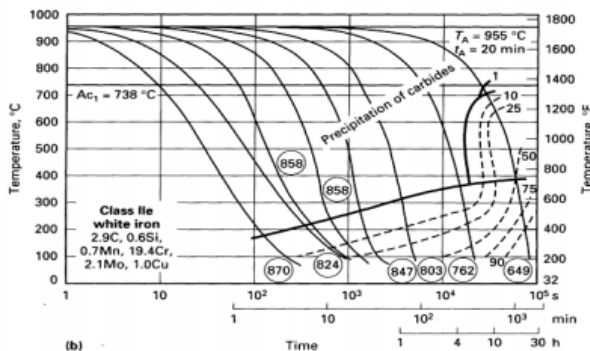
Gambar 2.14. Tiga Tahapan pada *quenching* (ASM Handbook Vol.4, 1991).



1). Tahap A: Pembentukan selimut uap (vapor blanket cooling stage). Pada tahap ini terjadi pembentukan selimut uap disekeliling benda kerja.

2). Tahap B: Perpindahan panas (Boiling cooling stage). Dimana terjadi laju transfer panas paling tinggi, berawal ketika temperature di permukaan logam berkurang sebagian dan lapisan uap tipis pecah. Kemudian penindihan cairan quenching dan panas terlepas dari logam dengan sangat cepat, sebagian besar sebagai panas penguapan. Titik didih dari media quench menentukan akhir dari tahap ini.

3). Tahap C: Pendinginan lambat (convection cooling stage) Tahap C berawal ketika temperatur di permukaan logam berkurang hingga titik didih dari cairan quenching. Di bawah temperatur tersebut, terjadi pendinginan lambat dengan konduksi dan konveksi.



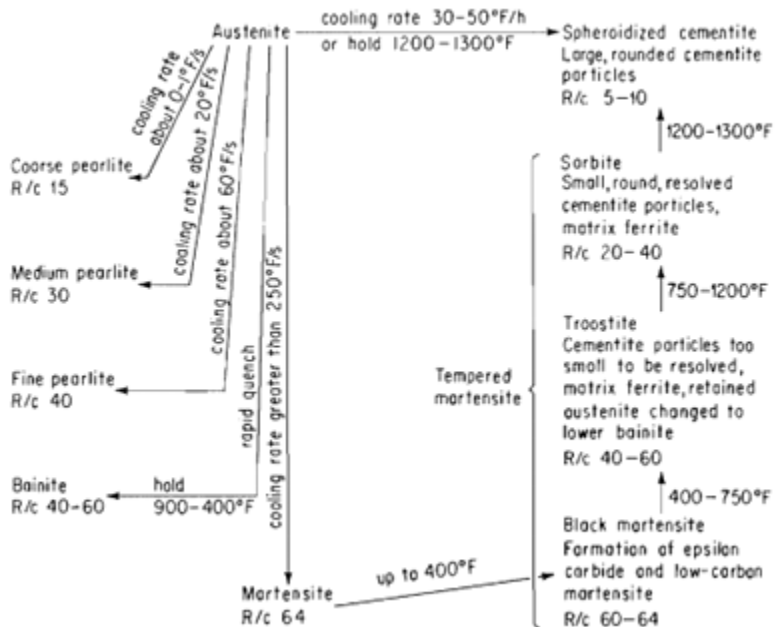
Gambar 2.15 Diagram CCT untuk *class II* white cast iron yang mengandung 2,9% C, 0,6% Si, 0,7% Mn, dan 19,4% Cr (ASM Handbook Vol.4, 1991).

2.10.4. Tempering

Tempering adalah proses pemanasan kembali baja yang telah dikeraskan sampai temperatur dibawah temperatur kritis terendah (A1), lalu didinginkan pada laju yang diinginkan.



Proses ini bertujuan untuk mengembalikan sebagian keuletan/ketangguhan, berakibat turunnya kekerasan, dan melepas tegangan dalam untuk memperoleh keuletan yang lebih baik. Struktur martensit dihasilkan dari proses *quenching*, maka dari itu ada tegangan internal besar, diperoleh dari transformasi martensit, sehingga keuletan berkurang. *Tempering* dapat meningkatkan keuletan dan ketangguhan, yang sangat penting untuk meningkatkan penyerapan energi impact dan struktur martensit temper menghasilkan kekuatan dinamik yang baik pada baja (LI Hong-ying, 2013). Martensit merupakan suatu struktur yang metastabil, bila dipanaskan kembali secara bertahap karbon yang terperangkap dalam struktur BCT dari martensit tersebut akan keluar menjadi karbida sehingga BCT akan menjadi BCC, ferrit.



Gambar 2.16 Perubahan fasa yang terjadi pada proses *tempering*.



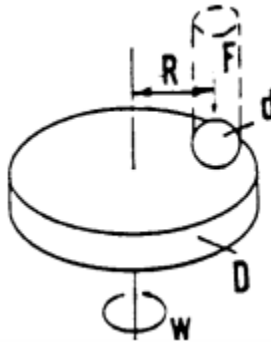
Perubahan struktur yang terjadi setelah proses tempering pada pemanasan temperatur tertentu, secara skematik digambarkan pada Gambar 2.16 Pada temperatur temper yang masih rendah, dibawah 205°C , karbon yang keluar masih sangat sedikit, karbida yang terjadi, dinamakan karbida epsilon (ϵ carbide), *submicroscopic*, martensit tampak lebih hitam (*black martensite*). Pada tahap ini terjadi penurunan tegangan dalam, sedang kekerasan hampir tidak berkurang (masih 60 - 64 HRC), bahkan dapat terjadi sedikit kenaikan (untuk baja dengan kadar karbon tinggi). Pada temperatur temper yang lebih tinggi, 205 – 400°C , karbida epsilon mulai berubah menjadi sementit, Fe_3C , dan austenit sisa bertransformasi, menjadi bainit atau martensit. Struktur yang terjadi dinamakan *troostite*, terdiri dari partikel sementit yang sangat halus (*submicroscopic*) dengan matriks ferrit dan austenit yang telah bertransformasi. Mulai tampak penurunan kekerasan (40 - 60 HRC) dan kenaikan keuletan yang berarti. Pada temperatur temper yang lebih tinggi lagi, 400 – 650°C , sementit tumbuh menjadi lebih besar, berbentuk spheroid yang halus dan BCT menjadi BCC sempurna. Struktur ini dikenal dengan nama *sorbite*, terdiri dari spheroid sementit yang sangat halus yang tersebar dalam matriks ferrit, kekerasan lebih rendah (20 - 40 HRC) dan keuletan/ketangguhan makin tinggi. Bila pemanasan diteruskan lebih tinggi lagi spheroid sementit tumbuh lebih besar dengan matriks ferrit. Struktur ini sama dengan yang diperoleh dengan proses spheroidisasi, kekerasannya rendah (5 - 10 HRC) dan keuletan/ketangguhannya tinggi.

Pada *high chromium white cast iron*, disarankan untuk melakukan *tempering* pada temperatur antara $200-230^{\circ}\text{C}$ ($400-450^{\circ}\text{F}$) selama 2 sampai 4 jam untuk mengembalikan sedikit ketangguhan dalam struktur martensit, serta untuk menghilangkan tegangan sisa. (*ASM Handbook Vol. 4*, 1991).



2.11 Pengujian Keausan

Pengujian ini mengacu pada ASTM G99 mengenai metode pengujian standar untuk keausan dengan peralatan *pin-on-disk*. Pengujian ini mencakup prosedur laboratorium untuk menentukan dan memperkirakan keausan material akibat gesekan. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



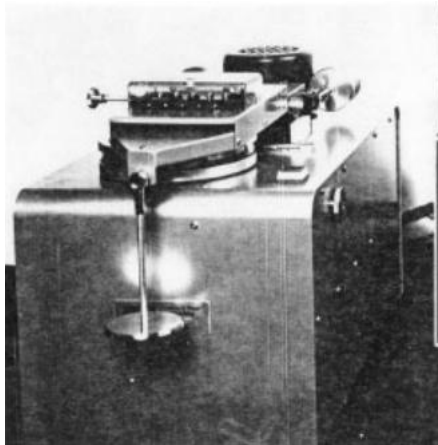
Gambar 2.17 Skema penggunaan *pin-on-disk*.
(ASTM G99, 2003)

Ada beberapa sistem yang biasa digunakan untuk sistem ini, antara lain poros yang bergerak dan penjepit untuk menahan *disk* yang berputar, tuas untuk menahan pin, serta alat tambahan untuk menempatkan beban yang diberikan pada pin.

Salah satu ketentuan yang dibutuhkan adalah spesimen memiliki dimensi tertentu yang dapat di persiapkan dan dapat menahan tekanan yang diberikan selama pengujian tanpa mengalami kegagalan. Bentuk pin secara khusus berbentuk silinder atau bola, dengan diameter antara 2-10 mm dan ukuran *disk* antara 30-100 mm, serta memiliki ketebalan dari 2-10 mm. Ada beberapa parameter dalam pengujian ini. Yang pertama adalah *load* atau nilai dari gaya yang diberikan pada pin terhadap *disk* dalam satuan Newton. *Speed*, yaitu kecepatan pergeseran



dari permukaan dari *pin* dan *disk* yang bersentuhan dalam meter per detik. *Distance*, merupakan jarak yang di tempuh selama pengujian berlangsung dalam meter. *Temperature*, spesifik pada lokasi dekat persentuhan antara *pin* dengan *disk*. Kondisi lingkungan dapat mempengaruhi pengujian ini (ASTM G99, 2003). Contoh alat uji keausan terdapat pada Gambar 2.18.



Gambar 2.18 Alat uji keausan. (ASTM G99, 2003).

Untuk menghitung *thickness loss*, digunakan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Laju Keausan} = \text{Ketebalan awal} - \text{Ketebalan Akhir} \dots\dots(2.2)$$

$$\text{Volume Keausan} = \frac{\text{Berat Keausan (gram)}}{\text{Berat jenis } \left(\frac{\text{gram}}{\text{mm}^3}\right)} \dots\dots\dots(2.3)$$

$$\text{Faktor Keausan} = \frac{\text{volume keau san (mm}^3\text{)}}{\text{Beban (N) x jarak tempu h (m)}} \dots\dots\dots (2.4)$$

$$\text{Konversi } \left(\frac{\text{mm}}{\text{jam}}\right) = \frac{\text{Laju Keausan (mm)}}{\text{menit}} \times 60 \frac{\text{menit}}{\text{jam}} \dots\dots\dots(2.5)$$



2.12 Penelitian Sebelumnya

Proses *thermal hardening-temper* pada besi tuang putih paduan krom tinggi (ASTM A532 Type-IIA) mampu meningkatkan nilai kekerasan melalui pembentukan struktur martensit temper dan peningkatan intensitas/volume karbida krom melalui pembentukan karbida sekunder. Nilai kekerasan optimal dari proses *thermal hardening-temper* terhadap material ASTM A532 Type II-A dengan media *quench* oli adalah 723 BHN pada temperatur *tempering* 300 °C, sedangkan untuk media *quench* udara paksa adalah 642 BHN pada temperatur *tempering* 250 °C. Kedua nilai kekerasan optimal tersebut diperoleh akibat tingginya volume karbida krom (Cr_7C_3) serta struktur karbida krom yang halus (*fine carbide*) diantara matriks martensit temper. Temperatur *tempering* lebih dari 300°C akan menghasilkan volume karbida yang rendah, diakibatkan oleh terdegradasinya karbida krom (Cr_7C_3), dimana hal tersebut akan berdampak negatif terhadap nilai kekerasan, dan ketahanan aus dari material ASTM A532 Type II-A. (Achmad, 2013).

Lama waktu tahan *tempering* mempengaruhi struktur mikro baja AAR-M201 Grade E. *Tempering* pada baja AAR-M201 Grade E menghasilkan struktur mikro asikular ferrit. Peningkatan temperatur *tempering* mengakibatkan struktur menjadi semakin halus (menyebar merata) antara ferrit dan karbida sementit (Fe_3C), yang semula cenderung menyisakan poligonal ferrit menjadi cenderung terbentuk asikular ferrit. Selain itu, lama waktu tahan *tempering* mempengaruhi sifat mekanik baja AAR-201 Grade E. Semakin lama waktu tahan pada proses *tempering* menyebabkan kekuatan luluh, kekuatan maksimum, dan kekerasan menurun, serta keuletan dan energi impak meningkat. (Rinelda, 2017).

Mikrostruktur dari *as-cast* material *high chromium white cast iron* terdiri dari dendrite austenite yang metastabil, karbida eutektik, dan martensit. Destabilisasi pada 800 ° C menyebabkan



presipitasi partikel sekunder (karbida) berkembang secara bertahap seiring dengan berjalannya waktu. Akibatnya, peningkatan kekerasan juga meningkat secara bertahap dalam. Sebagian matriks austenit bertransformasi menjadi martensit. Selama destabilisasi pada 900°C, kenaikan kekerasan cukup tajam karena presipitasi dari partikel karbida, yang mempunyai morfologi seperti pelat dan matriks menjadi bertransformasi menjadi martensit. Kecenderungan yang sama dalam kekerasan diamati untuk destabilisasi pada 1000°C. Nilai kekerasan maksimal diperoleh pada temperatur ini, karena kombinasi optimum presipitasi karbida, morfologi partikel karbida, serta struktur martensit yang terbentuk. Pada 1100°C, degradasi karbida terjadi, karena stabilisasi fase austenitik. Fenomena ini yang menjadi penyebab atas penurunan kekerasan hingga nilai yang lebih rendah dari yang dicapai pada saat temperatur 900°C dan 1000°C. (Karantzalis, 2008).

Semakin tinggi kadar karbon dan kromium pada besi tuang putih akan merubah karbida eutektik dari karbida M_3C yang kontinyu menjadi karbida M_7C_3 yang diskontinyu. Diatas 12 wt% Cr, karbida eutektik berubah menjadi tipe M_7C_3 . Karbida M_7C_3 memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibanding karbida M_3C , dengan nilai kekerasan sebesar 1400-1600 HV. Hal ini dapat memperbaiki sifat ketangguhan dan ketahanan aus, dibandingkan dengan material yang memiliki kadar kromium yang rendah. Pada paduan dengan kadar kromium lebih dari 25-30%, karbida dengan tipe $M_{23}C_6$ akan terbentuk dengan bentuk *fibrous*. (Wiengmoon, 2011).

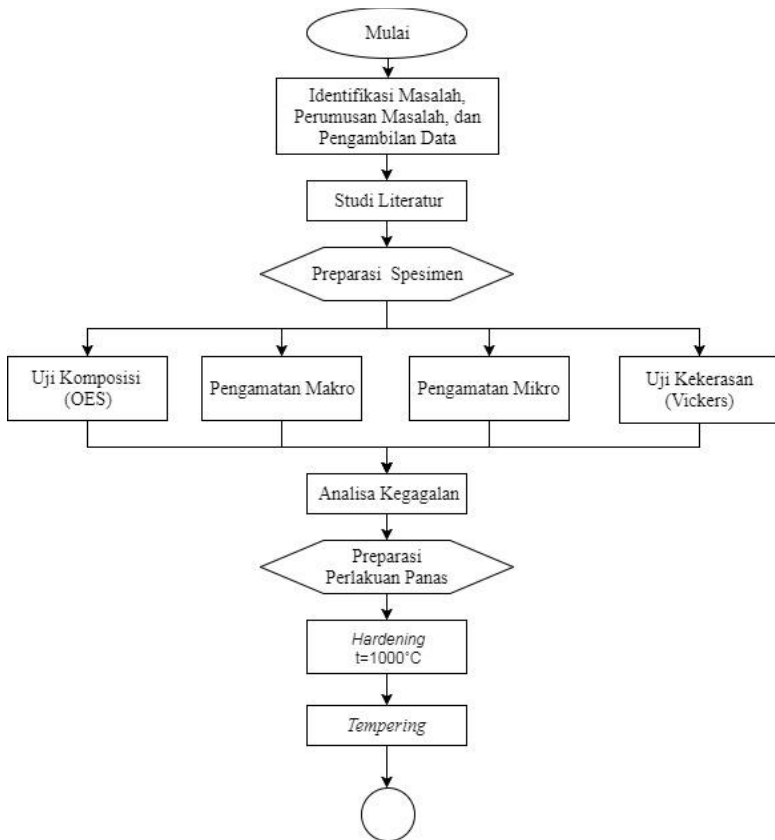


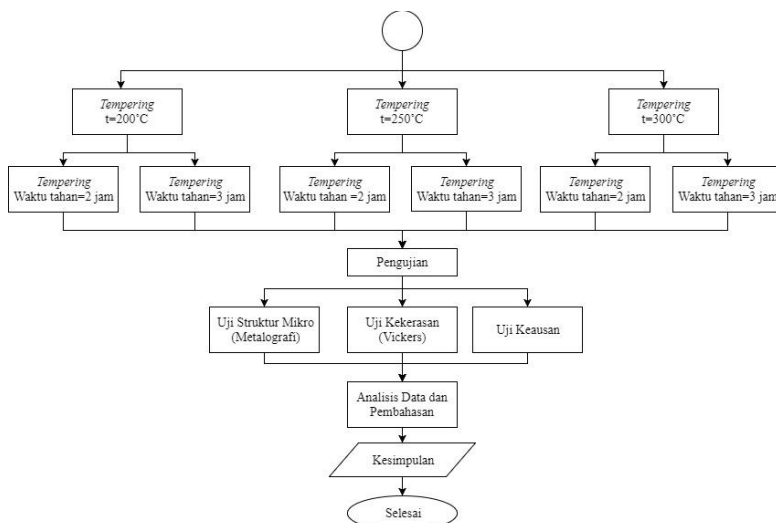
(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Metode Penelitian

Metode Penelitian yang digunakan dalam penelitian kali ini antara lain studi lapangan, pengujian dan studi literatur. Adapun hal-hal yang mencakup penelitian antara lain:

1. Studi lapangan

Metode ini mengacu pada pencarian informasi tentang komponen yang akan diteliti beserta informasi tentang kegagalan yang terjadi pada komponennya dengan cara terjun langsung ke lapangan yaitu PT. Semen Indonesia, Tbk, dan berdiskusi dengan dosen mata kuliah, dosen pembimbing, dan pihak PT. Semen Indonesia, Tbk yang ahli dibidangnya.

2. Studi Literatur

Metode studi literatur mengacu pada buku-buku, jurnal-jurnal penelitian, dan situs industri yang mempelajari tentang



permasalahan analisa kegagalan khususnya keausan pada *Hammer Crusher*.

3. Pengujian

Metode ini dilakukan dengan pengujian langsung sesuai dengan prosedur dan metode yang ada. menggunakan spektrometer (OES), uji kekerasan untuk mengetahui nilai kekerasan pada material *Hammer Crusher*, dan uji mikrostruktur untuk mengetahui struktur pada material *Hammer Crusher*.

3.3 Material yang Digunakan

1. Material

Pada tanggal 13 Mei 2017, *Hammer Crusher* pada *Clinker Cooler* Pabrik Tuban 1 mengalami keausan yang diperlihatkan pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 a.) Komponen *Hammer Crusher* yang mengalami aus. b.) Bagian *Hammer Crusher* yang masih utuh.

Material yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk merupakan baja *high chromium white cast iron* yang memiliki komposisi kimia seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 3.1.



Tabel 3. 1 Komposisi Kimia *Hammer Crusher*

Unsur	C	Mn	P	Si	Cr	W	Nb	Ni	Sn	Mo
%	1.70	0.67	0.03	0.84	16.8	1.47	0.79	0.48	0.008	0.893

3.4 Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Penggaris
Digunakan untuk mengukur spesimen.
2. Mesin *Wire Cut*
Digunakan untuk memotong spesimen.



Gambar 3.3 Mesin potong *Wire Cut*.

3. Kamera Digital
Digunakan untuk mendapatkan informasi kegagalan secara makro.



Gambar 3.4 Kamera Digital.

4. Mesin OES (Optical Emission Spectroscopy)
Digunakan untuk mengetahui komposisi material uji.



Gambar 3.5 Mesin uji *Optical Emission Spectroscopy* (OES).

5. Uji Kekerasan
Digunakan untuk mengetahui nilai kekerasan dari material uji.



Gambar 3. 6 *Universal hardness tester.*

6. Amplas grade 80 hingga 2000
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
7. Mesin Polish
Digunakan untuk preparasi pengujian mikroskop optik.
8. Larutan Etsa
Digunakan untuk preparasi pengujian metalografi. 74a terdiri dari 1-5mL + 100 mL ethanol (95%) atau methanol (95%)
9. Mesin *pin-on-disk*
Digunakan untuk melaksanakan uji keausan



Gambar 3.7 *Mesin pin-on-disk.*



10. Mikroskop Optik
Digunakan untuk mendapatkan informasi struktur mikro/fasa yang terdapat pada material uji.



Gambar 3.7 Alat uji mikroskop optik, *Olympus BX51 Optical Microscope*.

3.5 Tahapan Penelitian

3.5.1 Review Dokumen Perusahaan

Review dokumen perusahaan dilakukan untuk mendapatkan data-data perusahaan yang berkaitan dengan *Hammer Crusher* sebagai pendukung hasil penelitian, berikut data yang harus diambil, yaitu:

1. Desain *Hammer Crusher*
2. Data operasi
3. Spesifikasi material
4. *Maintenance record*

3.5.2 Preparasi Spesimen

Tahap Persiapan ini diperlukan sebelum melakukan pengujian untuk menentukan penyebab kegagalan material *Hammer Crusher* pada PT Semen Indonesia. Persiapan ini berupa proses *cutting* menggunakan *wire cut*. Proses



pemotongan dilakukan pada bagian ujung *Hammer Crusher* yang terindikasi adanya kegagalan. Spesimen terindikasi adanya beban siklik serta bagian yang jauh dari aus akan diuji sebagai perbandingan antara material yang baru dengan material yang sudah gagal.

3.5.3 Uji Komposisi

Pengujian komposisi kimia adalah untuk mengetahui komposisi kimia yang terdapat pada material yang mengalami kegagalan. Pada identifikasi komposisi kimia menggunakan alat *Optical Emission Spectroscopy (OES)* seperti pada Gambar 3.4, di Laboratorium Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS), menggunakan material dengan ukuran 20x20x20 mm, untuk mengetahui komposisi yang ada pada *Hammer Crusher*.

3.5.4 Pengamatan Makroskopik dan Mikroskopik

Pengamatan makro dilakukan untuk mengetahui bentuk, tampilan dan lokasi komponen yang mengalami kegagalan secara makro. Pengamatan makro dilakukan menggunakan kamera digital dan mikro dengan mikroskop optik. Adapun perlakuan terhadap sampel material sebagaiberikut:

1. Melakukan pengambilan fotografi dengan kamera digital untuk mendapatkan informasi bentuk dari kegagalan secara makro.
2. Pengamatan melalui *optical microscope* seperti pada Gambar 3.5 terhadap sampel material dengan beberapa kali perbesaran untuk mendapatkan struktur mikronya.

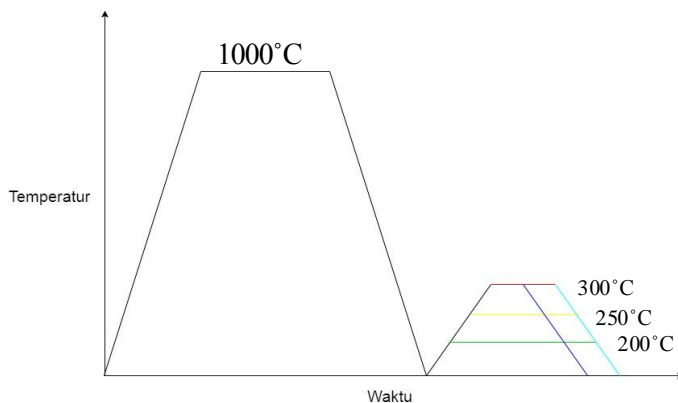


3.5.5 Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui distribusi kekerasan dengan melakukan indentasi di beberapa titik pada sampel material. Pengujian ini dilakukan dengan metode *Vickers* dimana dalam pengujiannya memakai indenter piramida intan, pembebanan sebesar 100 kg dan waktu indentasi selama 15 detik. Pengujian ini menggunakan *Universal Hardness Tester* di Laboratorium Metalurgi, Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, ITS yang terlihat pada Gambar 3.6.

III.5.6 Proses Perlakuan Panas

Proses perlakuan panas yang dilakukan adalah proses *hardening* dengan temperatur 1000°C dan waktu tahan 30 menit. Setelah melakukan proses *hardening*, spesimen akan diberi perlakuan *tempering* dengan dua variabel waktu tahan yang berbeda yaitu 120 dan 360 menit. Masing-masing variabel waktu tahan yang berbeda akan di *tempering* dengan tiga variabel temperatur yang berbeda yaitu 200°C , 250°C , dan 300°C .



Gambar 3. 8 Proses *hardening* dengan variasi temperatur dan waktu tahan tempering.



Keterangan:

- = Tempering 300°C
- = Tempering 250°C
- = Tempering 200°C
- = Holding time 120 menit
- = Holding time 180 menit

3.6 Rancangan Penelitian

Tabel 3.2 Rancangan Penelitian

Material	Handling	Temperature Tempering	Tempering Holding time (menit)	Pengujian OES	Uji Keausan	Uji Metalografi	Uji Kekerasan
AC	-	-	-	✓	✓	✓	✓
AQ	✓	-	-	-	✓	✓	✓
A1	✓	200°C	120	-	✓	✓	✓
A2	✓	200°C	360	-	✓	✓	✓
B1	✓	250°C	120	-	✓	✓	✓
B2	✓	250°C	360	-	✓	✓	✓
C1	✓	300°C	120	-	✓	✓	✓
C3	✓	300°C	360	-	✓	✓	✓



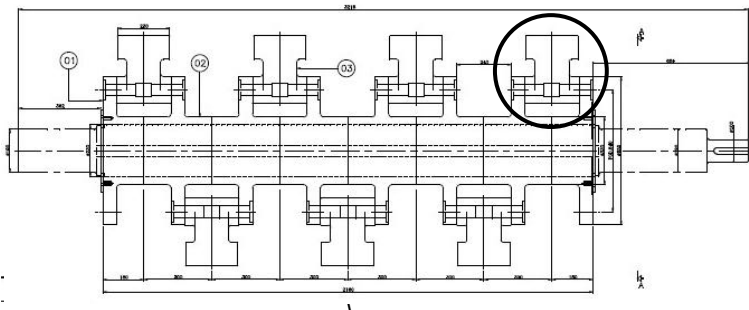
BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

IV.I Analisis Data

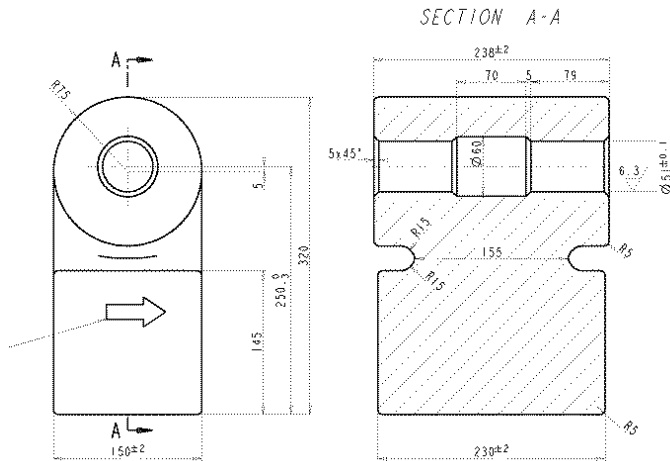
4.1.1 Analisis Data Material *Hammer Crusher*

Pada bulan mei 2017, PT. Semen Indonesia sedang melaksanakan maintenance rutin yang berlangsung selama 2 minggu. Kemudian di *Clinker Cooler* Tuban 1 ditemukan *hammer crusher* yang sudah mengalami aus sebelum waktunya. *Lifetime* yang didesain adalah selama 12 bulan, namun baru 6 bulan *hammer crusher* tersebut sudah mengalami kegagalan berupa aus. Bagian aus adalah bagian bawah *hammer crusher* yang terkena kontak langsung dengan *clinker* dengan temperatur operasi 100-250°C. *Hammer Crusher* ini menggunakan material *High Chromium White Cast Iron*.



Gambar 4.1 *Hammer crusher assembly*.

Gambar 4.1 menunjukkan gambar 1 set *assembly* dari *hammer crusher*. *Hammer crusher* dipasang berbaris horizontal pada *shaft* sejumlah 7 buah. *Hammer crusher* ini dapat bergerak searah jarum jam dengan bantuan *rotor* yang nantinya akan memukul *clinker* dan membuat ukuran *clinker* mengecil. Komponen *hammer crusher* ditunjukkan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Komponen *hammer crusher*.

Berikut ini data-data dari *hammer crusher* mencakup spesifikasi *hammer crusher* pada *clinker cooler*.

Tabel 4.1 Data Operasional Hammer Crusher.

Data Operasional Hammer Crusher	
Kecepatan Rotasi	349.598 rpm
Temperatur Kerja	100-250°C
Linear Speed	2073.66 mm/s
<i>Designed Lifetime</i>	12 bulan
<i>Product Clinker</i>	335 Ton/Hr

4.1.2 Pengujian Komposisi

Pengujian komposisi unsur dari spesimen *hammer crusher* dilakukan dengan menggunakan OES (*Optical Emission Spectroscopy*). Tabel 3.1 menunjukkan hasil pengujian OES yang dapat dibandingkan dengan komposisi material standar *hammer crusher*. Berdasarkan standar yang ada, komponen



clinker cooler biasanya menggunakan material besi tuang putih sesuai dengan standar ASTM A532, seperti yang ditunjukkan pada tabel 2.1

4.1.3 Hasil Pengamatan Makroskopik

Pengamatan secara makroskopik material *liner* dilakukan menggunakan kamera DSLR. Pengamatan secara makroskopik bertujuan untuk melihat kegagalan yang terjadi pada *hammer crusher*. Kegagalan yang terjadi pada crossbar berupa aus yang terdapat di bagian bawah *hammer crusher*, dimana tempat terjadinya kontak langsung antara *hammer crusher* dan *clinker*. Gambar 4.3 menunjukkan letak dari kegagalan yang terjadi pada *hammer crusher*. Bagian yang dilingkari pada gambar (a) merupakan bagian yang mengalami keausan. Ukuran panjang material *hammer crusher* berubah dari 320 mm menjadi 242 mm setelah bekerja selama 6 bulan. Selain itu, pada gambar (b) menunjukkan permukaan material yang mengalami penipisan terdapat goresan-goresan arah vertikal yang searah dengan arah penggerusan *clinker*.

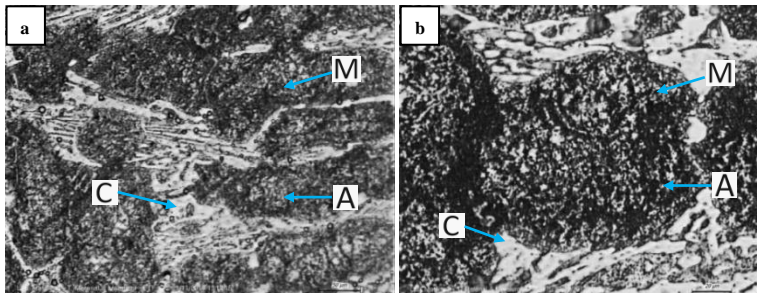


Gambar 4.3 Foto makroskopik material *hammer crusher* yang mengalami kegagalan (a) tampak depan; (b) tampak bawah.



4.1.4 Hasil Pengamatan Mikroskopik

Pengamatan struktur mikro dilakukan untuk melihat perubahan yang terjadi pada spesimen yang telah diberikan perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering* dengan beberapa variabel berbeda. Gambar 4.4 menunjukkan struktur mikro material *hammer crusher* sebelum diberi perlakuan panas (*as-cast*) pada perbesaran 200x dan 500x.



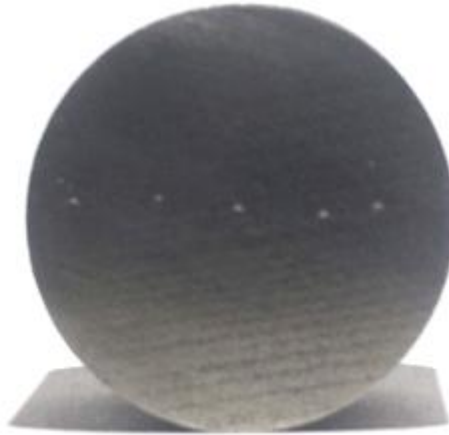
Gambar 4.4 Struktur mikro material *hammer crusher* pada kondisi *as-cast* dengan perbesaran: (a) 200x; (b) 500x. C, karbida; M, martensit; A, austenite. Etsa Nital 4%.

4.1.5 Hasil Pengujian Kekerasan

Pengujian kekerasan dilakukan pada permukaan spesimen. Uji kekerasan dilakukan di 5 titik indentasi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5 menggunakan standar ASTM E92 Hasil dari pengujian kekerasan dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Hasil uji kekerasan

Material	Nilai Kekerasan (HVN)
AC	$620.8 \pm 5,72$



Gambar 4.5 Titik indentasi uji kekerasan

4.1.6 Hasil Proses Pengerasan

Setelah dilakukan analisis mengenai kegagalan yang terjadi pada *hammer crusher*, dilakukan perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering* pada material *crossbar*. Hardening dilakukan pada temperatur 1000°C dengan waktu tahan 4 jam. Untuk tempering dilakukan dengan variasi temperatur 200°C , 250°C , dan 300°C dengan variasi waktu tahan 120 dan 360 menit pada masing-masing variasi temperatur. Untuk memudahkan dalam menganalisis, spesimen dengan variasi temperatur dan waktu tahan tempering berbeda, maka diberikan kode seperti pada tabel 4.3.

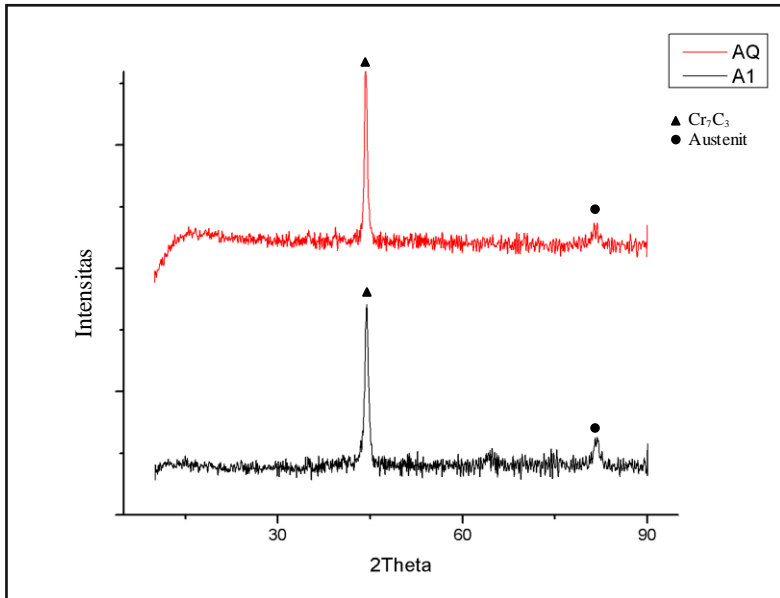


Tabel 4.3 Kode penamaan perlakuan panas

Kode	Jenis Perlakuan Panas
AQ	<i>Hardening</i>
A1	<i>Hardening + Tempering 200°C holding time 120 men it</i>
A2	<i>Hardening + Tempering 200°C holding time 360 men it</i>
B1	<i>Hardening + Tempering 250°C holding time 120 men it</i>
B2	<i>Hardening + Tempering 250°C holding time 360 men it</i>
C1	<i>Hardening + Tempering 300°C holding time 120 men it</i>
C2	<i>Hardening + Tempering 300°C holding time 360 men it</i>

4.1.7 Hasil Pengujian XRD

Pengujian XRD dilakukan untuk mengetahui senyawa apa saja yang terdapat dalam material *hammer crushers* setelah diberi proses perlakuan panas. Grafik hasil XRD dari material *hammer crusher* yang telah diberi perlakuan panas dapat dilihat pada Gambar 4.6. Secara umum, senyawa yang muncul pada seluruh spesimen adalah sama, yaitu austenit, dan karbida Cr_7C_3 .



Gambar 4.6 Grafik hasil pengujian XRD material *hammer crusher*.

Gambar 4.6 menunjukkan grafik hasil XRD dari material *hammer crusher*. Grafik yang berwarna merah merupakan spesimen AQ yang telah mendapat perlakuan panas berupa *hardening*. Sedangkan grafik yang berwarna hitam merupakan spesimen A1 yang telah mendapat perlakuan panas berupa *hardening* dan *tempering* pada temperatur 200°C dengan waktu tahan selama 2 jam.



Untuk memudahkan dalam membandingkan *peak* yang muncul pada seluruh material secara lebih detil, disajikan tabel 4.4 sebagai berikut.

Tabel 4.4 Hasil pengujian XRD material *hammer crusher*

Material	Pos (°2Th)	Height (cts)	Fasa	Nomor ICDD
AQ	44.2448	595.15	Cr ₇ C ₃	96-100-1020
	81.39	226.3	Austenit	96-901-3481
A1	44.3867	603.79	Cr ₇ C ₃	96-100-1020
	81.9163	94.75	Austenit	96-901-3475

4.1.7 Hasil Pengujian Kekerasan

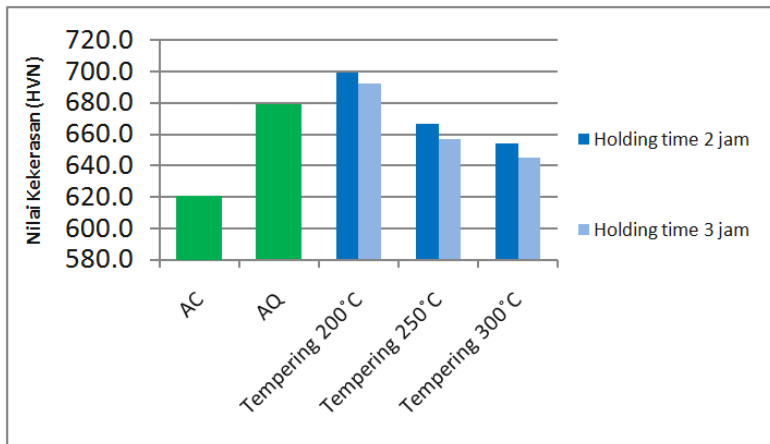
Pengujian kekerasan dilakukan pada masing-masing permukaan spesimen *as-quenched* dan *as-tempered*. Sebagai perbandingan, ditampilkan pula hasil uji kekerasan pada material *as-cast*. Titik indentasi dilakukan pada material *hammer crusher* berukuran ukuran diameter 17 mm dan tebal 11 mm di 5 titik, sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.5. Hasil dari pengujian kekerasan masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 4.5.



Tabel 4.5 Hasil uji kekerasan material *hammer crusher* setelah perlakuan panas.

Material	Nilai Kekerasan (HVN)
AC	620.8 ± 5,72
AQ	678.4 ± 6,73
A1	699.6 ± 9,61
A2	692.4 ± 8,56
B1	666.8 ± 10.13
B2	657.2 ± 9,20
C1	654.2 ± 7,01
C2	645.6 ± 8,96

Dapat dilihat pada Tabel 4.5 bahwa setelah mengalami perlakuan panas terjadi perubahan nilai kekerasan pada material *hammer crusher*. Untuk melihat data uji kekerasan secara lebih jelas, ditampilkan grafik nilai kekerasan material *hammer crusher* pada Gambar 4.7

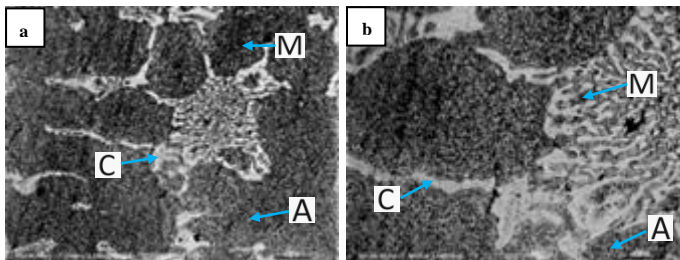


Gambar 4.7 Grafik Hasil Uji Kekerasan material *hammer crusher*.



4.1.8 Hasil Pengamatan Mikroskopik

Pengujian struktur mikro dilakukan untuk mengetahui struktur akhir yang terbentuk pada material *hammer crusher* setelah dilakukan perlakuan panas. Pengamatan yang dilakukan yaitu dengan menggunakan mikroskop optik pada perbesaran 200x dan 500x. Struktur mikro pada kondisi *as-queched* ditunjukkan pada gambar 4.8. Sedangkan struktur pada berbagai macam kondisi *as-tempered* ditunjukkan pada gambar 4.9 dan 4.11.

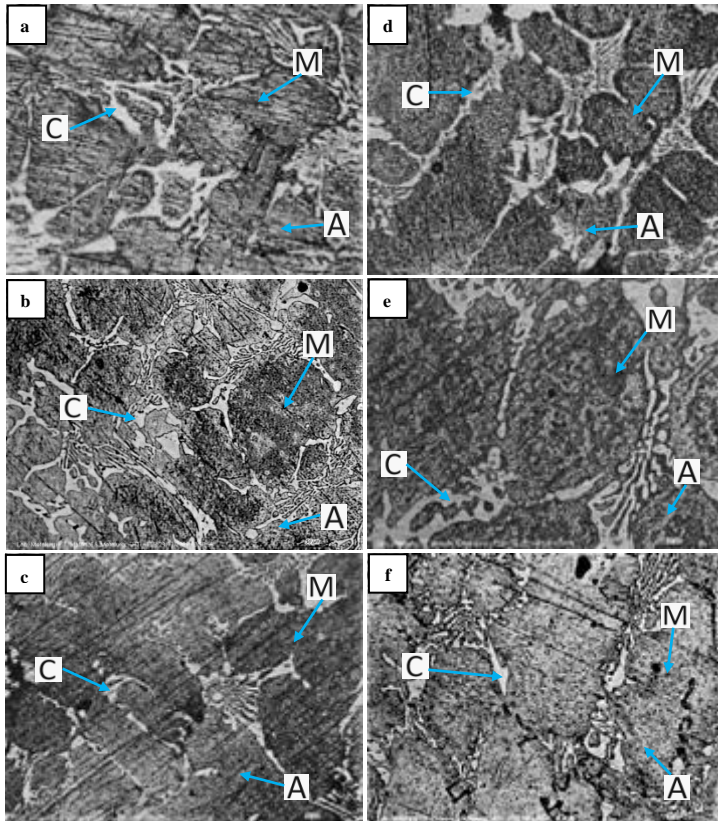


Gambar 4.8 Struktur mikro material *hammer crusher* pada kondisi *as-quenched*. (a) Perbesaran 200x, (b) Perbesaran 500x. C, karbida; M, martensit; A, austenite. Etsa Nital 4%.

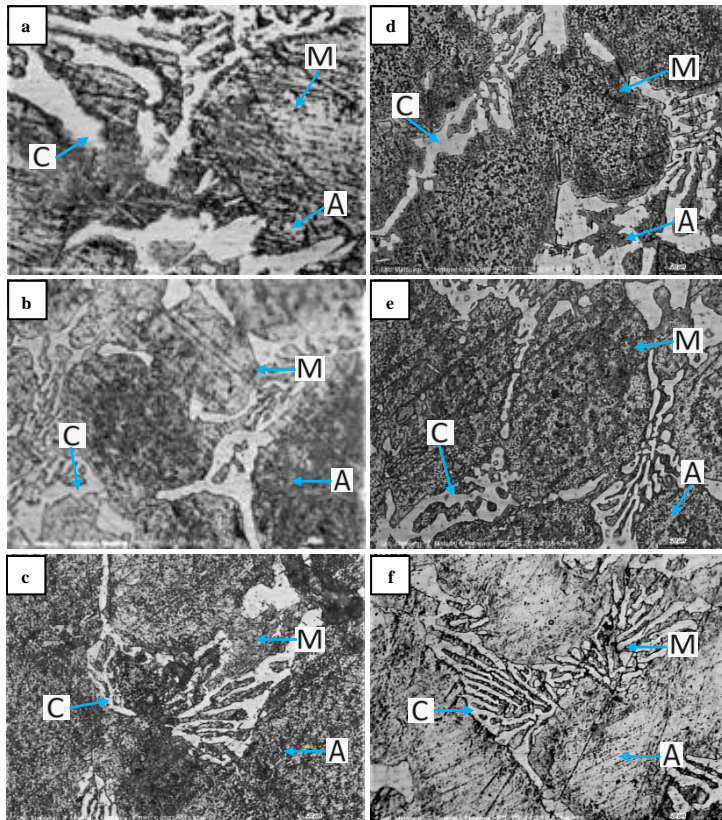
Untuk menghitung jumlah volume karbida yang terkandung pada material, digunakan aplikasi Imagej pada perbesaran 200x. Hasil perhitungan jumlah volume karbida ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Perhitungan volume karbida.

Spesimen	Volume Karbida (%)
A1	20,74
A2	20,35
B1	14,43
B2	13,63
C1	13,06
C2	12,26



Gambar 4.9 Struktur mikro material *hammer crusher* pada berbagai kondisi *as-tempered* dengan waktu tahan 2 jam dengan media *quench oli*: (a) *as-tempered* 200 °C, (b) *as-tempered* 250 °C, (c) *as-tempered* 300 °C; dan kondisi *as-tempered* dengan waktu tahan 3 jam dengan media *quench oli*: (d) *as-tempered* 200 °C, (e) *as-tempered* 250 °C, (f) *as-tempered* 300 °C. C, karbida; M, martensit; A, austenit. Etsa Nital 4%. Perbesaran 200x.



Gambar 4.10 Struktur mikro material *hammer crusher* pada berbagai kondisi *as-tempered* dengan waktu tahan 2 jam dengan media *quench oli*: (a) *as-tempered* 200 °C, (b) *as-tempered* 250 °C, (c) *as-tempered* 300°C; dan kondisi *as-tempered* dengan waktu tahan 3 jam dengan media *quench oli*: (d) *as-tempered* 200 °C, (e) *as-tempered* 250 °C, (f) *as-tempered* 300 °C. C, karbida; M, martensit; A, austenit. Etsa Nital 4%. Perbesaran 500x.



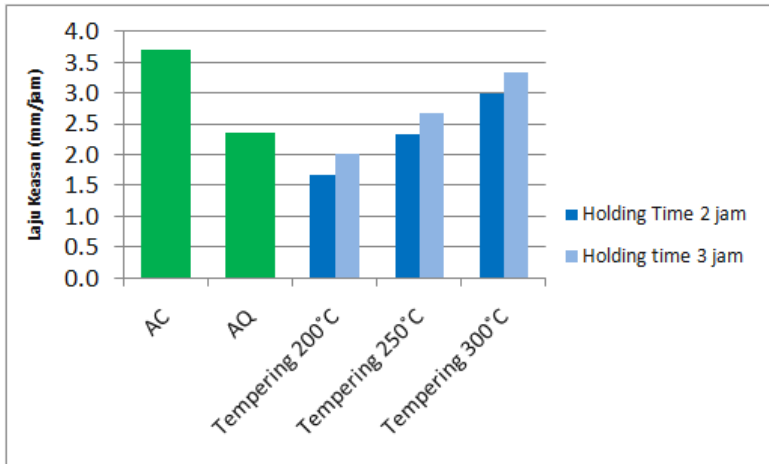
4.1.9 Hasil Pengujian Keausan

Pengujian keausan dilakukan bertujuan untuk mengetahui laju keausan pada material *hammer crusher*. Pada pengujian ketahanan aus, data yang diperoleh berupa selisih massa material *hammer crusher* sebelum dan setelah pengujian. Hasil tersebut kemudian dikonversikan menjadi *thickness loss* per jam untuk luasan permukaan spesimen dengan ukuran diameter 17 mm dan tebal 10.8-11 mm. Hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.7 sebagai berikut.

Tabel 4.7 Hasil Pengujian Keausan.

Material	Laju Keausan (mm/jam)
AC	$3,67 \pm 0.076$
AQ	$2,33 \pm 0.029$
A1	$1,67 \pm 0.029$
A2	$2,00 \pm 0.050$
B1	$2,33 \pm 0.029$
B2	$2,67 \pm 0.058$
C1	$3,00 \pm 0.075$
C2	$3,33 \pm 0.058$

Untuk melihat data uji keausan secara lebih jelas, ditampilkan grafik laju keausan material *hammer crusher* pada Gambar 4.11 Ditampilkan pula hasil uji keausan pada spesimen *as-cast* dan *as-quenched* sebagai perbandingan.



Gambar 4.11 Grafik Hasil Uji Keausan material *hammer crusher*.

4.2 Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian awal berupa komposisi dan kekerasan material, diperoleh bahwa kegagalan yang terjadi pada material *hammer crusher* ini karena ketidaksesuaian material yang digunakan dengan material standar. Material standar yang seharusnya digunakan adalah ASTM A532: *Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons*. Tabel 3.1 menunjukkan komposisi kimia pada sampel uji dan material standar *hammer crusher*. Hasil uji komposisi menunjukkan bahwa komposisi yang dimiliki oleh material *hammer crusher* tidak sesuai dengan standar ASTM A532 class IIA, IIB, II D, dan III A. Namun jika ditinjau dari kadar kromium, material *hammer crusher* lebih mendekati pada class IIB. Kadar kromium yang dimiliki material *hammer crusher* adalah 16,9%, sedangkan pada standar adalah 14-18%. Dilihat dari kadar karbonnya, material *hammer crusher* memiliki kadar karbon sebanyak 1,70%, lebih rendah dibandingkan karbon standar pada ASTM 1532 senilai 2,0-3,3% *max*. Perbedaan komposisi inilah yang menjadi salah



satu penyebab material *hammer crusher* memiliki nilai kekerasan dan kekuatan yang lebih rendah dibandingkan material standar. Penambahan kandungan karbon pada baja dapat meningkatkan kekerasan dan kekuatan tariknya, namun di sisi lain membuatnya menjadi getas, serta menurunkan keuletannya. Komposisi standar untuk *hammer crusher* yang seharusnya harus memiliki kadar karbon minimal 2%. Oleh karena itu, komposisi material *hammer crusher* yang ada di PT. Semen Indonesia ini tidak memenuhi standar sehingga terjadi keausan.

Jika ditinjau dari standar kekerasan material, kekerasan minimum yang seharusnya dimiliki material *hammer crusher* sesuai standar ASTM A532 adalah sebesar 660 HV, sementara material *hammer crusher* yang digunakan oleh PT. Semen Indonesia (Persero) Tbk memiliki kekerasan 620,8 HV, ditunjukkan oleh tabel 4.2. Dengan hasil uji kekerasan tersebut, terlihat bahwa nilai kekerasan material yang digunakan lebih rendah dari standarnya yang seharusnya.

Pada observasi makroskopik yang terdapat pada gambar 4.3, terlihat bahwa pada material *hammer crusher* yang telah mengalami kegagalan terjadi pengurangan panjang dari 320 mm menjadi 242 mm, yang berarti kehilangan panjang sebanyak 78 mm. Pada bagian yang mengalami keausan, terdapat goresan vertikal yang searah dengan arah penggerusan *clinker*. Hal tersebut menunjukkan bahwa material *hammer crusher* bekerja pada kondisi dengan perilaku *abrasive wear*. Apabila partikel-partikel kecil yang keras dan tajam (seperti debu atau partikel keras dari proses permesinan tertentu) mengabrasi permukaan material yang lain, permukaan material yang terabrasi terdapat adanya goresan-goresan.

Pada pengujian metalografi, didapatkan struktur mikro material *as-cast* yang terdiri dari austenit, karbida krom, dan martensit yang ditunjukkan pada gambar 4.4. Pada gambar, bagian yang berwarna putih terang merupakan karbida eutektik. Sedangkan bagian berbentuk pulau merupakan matriks austenit (berwarna terang) dengan campuran martensit (berwarna gelap). Hal ini berkesesuaian dengan penelitian Karantaliz pada tahun



2008 bahwa mikrostruktur dari *as-cast alloy high chromium besi tuang putih* terdiri dari dendrit austenit yang metastabil, karbida (Cr_7C_3) dan juga martensit.

Untuk memperbaiki sifat kekerasan dan ketahanan aus dari material *liner* maka diberikan perlakuan panas pada material *hammer crusher*. Setelah material *hammer crusher* diberi perlakuan *hardening* pada temperatur 1000°C dan dilanjutkan dengan *tempering* dengan variable temperatur dan waktu tahan yang berbeda, didapatkan perbedaan baik kekerasan maupun struktur mikro material dari kondisi *as-cast*. Tabel 4.4 menunjukkan data hasil uji kekerasan setelah perlakuan panas. Pada kondisi *as-quenched*, kekerasan material *hammer crusher* naik menjadi 678,40 HV. Hal ini terjadi salah satunya dikarenakan terbentuknya struktur martensit pada saat pendinginan cepat. Struktur awal martensit mulai terbentuk saat austenit didinginkan dengan cepat dan dapat mencapai temperatur M_s . Karena pendinginan yang cepat, maka karbon bebas yang terlarut di dalam austenit tidak sempat berdifusi keluar kisi kristal sehingga tidak terjadi transformasi FCC menjadi BCC, melainkan terjadi transformasi geser pada kisi kristal menjadi bentuk struktur BCT. Struktur BCT ini menjadi sangat tegang, karena itu menjadi keras dan getas. Kekerasan martensit sendiri juga bergantung pada kadar karbon yang terkandung pada material. Semakin tinggi kadar karbonnya, maka akan semakin tinggi pula kekerasan martensitnya. Penyebab kenaikan kekerasan lainnya adalah karena adanya struktur karbida krom. Ketika proses austenisasi berlangsung, unsur kromium dalam matriks akan bereaksi dengan karbon membentuk senyawa karbida Cr_7C_3 . Pada gambar 4.8 ditunjukkan mikrostruktur pada kondisi *as-quenched*. Bagian yang berwarna putih terang merupakan karbida eutektik, sedangkan bagian berbentuk pulau merupakan matriks austenit (warna terang) dengan campuran martensit (warna gelap).

Pada material besi tuang putih paduan krom tinggi, pembentukan senyawa Cr_7C_3 lebih stabil dibandingkan dengan Cr_{23}C_6 untuk material besi tuang putih paduan krom tinggi



dengan komposisi 2-2,5 % C dan 10-25% Cr. Karbida Cr_7C_3 lebih stabil pada kondisi tersebut karena berada pada komposisi dan temperatur yang tepat. Karbida Cr_7C_3 yang terdapat pada material *hammer crusher* diperkuat dengan hasil uji XRD pada gambar 4.7 dimana terdapat karbida Cr_7C_3 pada *peak* tertentu. Data pada tabel 4.5 menunjukkan bahwa pada material AQ muncul *peak* karbida Cr_7C_3 pada posisi $2\theta=44.2448^\circ$ dan pada material A1 muncul *peak* karbida Cr_7C_3 pada posisi $2\theta=44.3867^\circ$.

Setelah diberi perlakuan tempering pada temperatur 200°C , kekerasan kembali naik menjadi 699,6HV dan 692,4 HV masing-masing pada variabel waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Hal ini disebabkan karena adanya *secondary hardness* dari material *hammer crusher* saat *tempering*. *Secondary hardness* diakibatkan adanya kandungan unsur pembentuk dan penstabil karbida, yaitu kromium, yang menyebabkan kekerasan naik setelah dilakukan *tempering*. Terbentuknya karbida terjadi akibat adanya unsur – unsur pembentuk karbida dalam jumlah yang tinggi, seperti kromium, sehingga ketika diberi perlakuan *tempering* pada temperatur tertentu terdapat energi yang cukup untuk membentuk karbida. Keberadaan karbida sekunder (*secondary carbide*) dalam matriks pada material *high chromium white cast iron* juga dapat memberikan peningkatan yang signifikan terhadap nilai kekerasan dan ketahanan aus dari material tersebut, mekanisme ini disebut *precipitation hardening*. Karbida sekunder (*secondary carbide*) terbentuk akibat proses perlakuan panas, dimana unsur krom yang terlarut dalam matriks berdifusi dengan unsur karbon membentuk senyawa karbida dalam matriks. Karbida tersebut bersifat diskontinyu dan tersebar dalam matriks austenite. Hal ini berkesesuaian dengan penelitian Achmad Shofi pada tahun 2013 bahwa proses *thermal hardening-temper* pada besi tuang putih aduan krom tinggi mampu meningkatkan nilai kekerasan.

Kekerasan material menurun saat diberi perlakuan berupa *tempering* 250°C dengan kekerasan sebesar 666,8 HV dan 657,2 HV masing-masing pada waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Kemudian, kekerasan kembali turun saat diberi perlakuan berupa *tempering* 300°C dengan kekerasan sebesar 654,2HV dan 645,6



HV masing-masing pada waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Jika dilihat dari struktur mikro dengan perbesaran 200x pada gambar 4.10, material dengan temperatur *tempering* 300°C memiliki volume karbida yang lebih kecil dibandingkan dengan material dengan temperatur *tempering* 250°C dan 200°C. Hal inilah yang mempengaruhi penurunan kekerasan pada temperatur *tempering* yang lebih tinggi. Semakin rendah volume karbida pada material besi tuang putih paduan krom tinggi, maka akan semakin rendah pula nilai kekerasan dari material tersebut. Penurunan volume karbida pada temperatur *tempering* yang lebih tinggi dibuktikan dengan perhitungan volume karbida pada tabel 4.6. Hasil perhitungan volume karbida menunjukkan bahwa pada temperatur *tempering* 200°C, 250°C, dan 300°C, jumlah volume karbida yang terdapat pada masing-masing mikrostruktur adalah sebanyak 20,74%; 14,43%; dan 13,06% pada waktu tahan 2 jam dan sebanyak 20,35%; 13,63; dan 12,26% pada waktu tahan 3 jam. Pada gambar 4.9 dan 4.10 ditunjukkan mikrostruktur pada berbagai kondisi *as-tempered* dengan perbesaran masing-masing 200x dan 500x. Bagian yang berwarna putih terang merupakan karbida eutektik, sedangkan bagian berbentuk pulau merupakan matriks austenit (warna terang) dengan campuran martensit (warna gelap).

Menurunnya volume karbida krom pada temperatur 250°C dan 300°C ini disebabkan oleh terdegradasinya karbida tersebut menjadi struktur austenit akibat temperatur *tempering* yang terlalu tinggi. Hal ini terjadi akibat pada temperatur yang lebih tinggi, karbon yang terlarut pada karbida akan keluar dan kembali menjadi austenite.

Jika variabel waktu tahan 2 jam dan 3 jam dibandingkan, dapat dilihat bahwa material *hammer crusher* dengan waktu tahan 2 jam memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi dibanding spesimen dengan waktu tahan 3 jam. Hal ini membuktikan bahwa waktu tahan mempengaruhi kekerasan dari baja karena terjadi perubahan martensit menjadi temper martensit. Semakin lama waktu tahan pada proses *tempering* menyebabkan kekerasan menurun. Hal ini berkesesuaian dengan penelitian Rinelda pada



tahun 2017.

Pada uji keausan, sifat ketahanan aus material *hammer crusher* direpresentasikan dengan nilai laju keausan dengan satuan mm/jam. Pada tabel 4.7 ditunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur *tempering*, maka semakin tinggi pula tingkat keausan material *hammer crusher*. Nilai laju keausan pada temperatur *tempering* 200°C, 250°C, dan 300°C pada waktu tahan *tempering* 2 jam masing-masing adalah 1,67 mm/menit; 2,33 mm/menit; dan 3 mm/menit. Sedangkan nilai laju keausan pada temperatur *tempering* 200°C, 250°C, dan 300°C pada waktu tahan *tempering* 3 jam masing-masing adalah 2 mm/menit; 2,33 mm/menit; dan 3 mm/menit. Dapat dilihat pula pada Tabel 4.7 bahwa semakin lama waktu tahan *tempering*, maka semakin tinggi pula tingkat keausan material. Material *as-cast* dan *as-quenched* juga diuji ketahanan ausnya, dimana masing-masing nilai keausannya adalah 3,67 mm/menit dan 2,33 mm/menit. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sifat ketahanan aus berbanding lurus dengan nilai kekerasan suatu material. Semakin tinggi nilai kekerasan suatu material, maka makin tinggi pula ketahanan aus material tersebut.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Semakin tinggi temperatur *tempering*, maka akan mengakibatkan turunnya sifat kekerasan. Temperatur *tempering* yang paling optimal terdapat pada temperature 200°C dengan nilai kekerasan 699,6 HV dan 678,4 HV masing-masing pada waktu tahan 2 jam dan 3 jam. Struktur mikro yang dihasilkan adalah karbida krom (Cr_7C_3), austenite, dan juga martensit. Nilai kekerasan material berbanding terbalik terhadap laju keausan material, dimana semakin keras suatu material, maka laju keausan material akan semakin kecil. Temperatur *tempering* yang paling optimal menghasilkan laju keausan sebesar 1,67mm/jam.
2. Semakin lama waktu tahan pada proses *tempering*, maka akan mengakibatkan turunnya sifat kekerasan. Waktu tahan *tempering* yang paling optimal adalah selama 2 jam dengan nilai 699,6 HV; 666,8 HV; dan 654,2 HV masing-masing pada temperatur 200°C,

5.2 Saran

1. Menggunakan produk yang sesuai dengan standar *hammer crusher* yang berlaku.
2. Melakukan uji komposisi produk untuk memastikan kesesuaian produk dengan standar yang berlaku.
3. Melakukan proses *heat treatment* pada material *hammer crusher* sehingga nilai kekerasan yang dimiliki sesuai dengan standar ASTM A532.



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- _____. 1999. ASTM A532. *Standard Specification for Abrasion-Resistant Cast Irons*. USA: ASM International.
- _____. 1999, ASTM A681. *Standard Specification for Tool Steels Alloy*. USA: ASM International
- _____. 1999, ASTM E3-11. *Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens*. USA: ASM International
- _____. 1999, ASTM G99. *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. USA: ASM International
- _____. 1990. **ASM Handbook Volume 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys**. ASM International Handbook Committee.
- _____. 1991. **ASM Handbook Volume 4: Heat Treatment**. ASM International Handbook Committee.
- _____. 2004. **ASM Handbook Volume 9: Metallography and Microstructures**. ASM International Handbook Committee
- _____. 2017. **FLSmidth Cross Bar Cooler**.
<URL:<http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Pyroprocessing/FLSmidth+Cross-Bar+Cooler/FLSmidth+Cross-Bar+Cooler>>
- Andrianto, Novi. 2014. **Karakterisasi Sifat Keausan Dan Ketahanan Korosi Material Disc Refiner White Cast Iron Dan Stainless Steel**. Semarang: Jurnal Teknik Mesin S-1, Vol. 2, No. 4

- Anwar, Khairil. 2011. *Analisis Perpindahan Panas Grate Cooler Industri Semen*. Palu: Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tadulako.
- Avner, Sidney H. 1974. *Introduction To Physical Metallurgy*. Singapore: McGraw-Hill Book Co.
- Callister, William. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Campbell, F.C. 2008. *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys*. New York: ASM International.
- Charles F, Walton. 1996. *Iron Castings Handbook*. Illinois: Iron Casting Society.
- Cobos, Oscar Fabian Higuera. 2015. *Improvement of Abrasive Wear Resistance of the High Chromium Cast Iron ASTM A-532 Through Thermal Treatment Cycles*.
- Diajeng, Novia. 2017. *Analisis Kegagalan Pada Hammer Crusher di Clinker Cooler Tuban 1, PT. Semen Indonesia*. Surabaya: ITS.
- Dieter, George E. 1987. *Metalurgi Mekanik*. Jakarta: Erlangga.
- Edahwati, Luluk. 2009. *Alat Industri Kimia*. Surabaya: UPN Press
- Edahwati, Luluk. 2009. *Alat Industri Kimia*. Surabaya: UPN Press
- Firdaus, Apriyadi. 2007. *Proses Pembuatan Semen Pada PT. Holcim Indonesia Tbk*. Banten: Jurusan Teknik Kimia Fakultas Teknik Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Habibi, Firdaus. *Karakterisasi Sifat Fisis dan Mekanis Saat Grinding Ball Import Diameter 40mm yang Digunakan di Indocement Tunggal Prakarsa*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Haimbaugh, R.E. 2001. *Practical Induction Heat*

- Treating***. ASM Internationals.
- Inthidech, Sudsakorn. 2006. ***Effect of Alloying Elements on Heat Treatment Behavior of Hypoeutectic High Chromium Cast Iron. The Japan Institute of Metals***.
- Karantzalis, E. 2009. ***Microstructural Modifications of As-Cast High-Chromium White Iron by Heat Treatment***. ASM Internationals.
- Karantzalis, E. 2017. ***Microstructure And Properties Of HighChromium Cast Irons: Effect Of Heat Treatments And Alloying Additions***. Southern Cross University: International Journal of Cast Metals Research.
- Kurnia, Endah. 2016. ***Studi Eksperimen Dan Analisa Keausan Journal Bearing Dry Contact Pada Rotary Valve Mesin Pembuat Pasta***. Surabaya: ITS.
- Krauss, G. 1989. ***Steels: Heat Treatment and Processing Principles***. USA: ASM International
- Kozin,M. 2012. ***Pengaruh Proses Perlakuan Panas Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Roda Kereta Api Buatan Lokal***. Depok: Universitas Indonesia.
- Li, Da. dkk. 2009. ***Phase Diagram Calculation of High Chromium Cast Irons and Influence of It's Chemical Composition***. Materials & Design
- LI Hong-ying, dkk. 2013. ***Effect of tempering Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 6150 Steel***. Journal Central South University.
- Mizhar, Susri. 2011. ***Pengaruh Perbedaan Kondisi Tempering Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Dari Baja AISI 4140***. Medan: Jurnal

- Murtiono, Arief. 2012. ***Pengaruh Quenching dan Tempering Terhadap Kekerasan dan Kekuatan Tarik Serta Struktur Mikro Baja Karbon Sedang Untuk Mata Pisau Pemanen Sawit***. Sumatera: Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sumatera Utara.
- Muslim, Khairul. 2008. ***Pengaruh Perlakuan Quench Temper dan Spheroidized Anneal Terhadap Sifat Mekanis Baja Perkakas***. Depok : Universitas Indonesia
- Nurjaman, Fajar. 2012. ***Pembuatan Grinding Ball dari Material White Cast Iron dengan Penambahan Chromium, Molybdenum, Vanadium, dan Boron Sebagai Unsur Paduan Pembentuk Karbida***. Depok: Universitas Indonesia.
- Rinelda. 2017. ***Analisa Pengaruh Lama Waktu Tahan Tempering terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Coulper Baja AAR-M201 Grade E***. Jurnal Teknik ITS POMITS Vol. 6.
- Setyana, Lilik. 2015. ***Studi Ukuran Grafit Besi Cor Kelabu Terhadap Laju Keausan Pada Produk Blok Rem Metalik Kereta Api***. Yogyakarta: Jurnal Material Teknologi Proses Volume 1, Nomor 1.
- Shofi, Achmad. dkk. ***Karakteristik Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Besi Tuang Putih Paduan Krom Tinggi Hasil Thermal Hardening Untuk Aplikasi Grinding Ball***. Lampung: UPT Balai Pengolahan Mineral Lampung

- Smith, J.L., Russel, G.M., & Bhatia, S.C. 2009. *Heat Treatment of Metals Vol 1*. Singapore: Alkem Company.
- Subardi. 2011. *Pengaruh Viskositas Media Celup Terhadap Kekerasan Dan Struktur Mikro Besi Tuang ASTM A532*. Yogyakarta: Traksi. Vol. I 1. No. 1.
- Tarina, Dwi. 2012. *Studi Eksperimental Laju Keausan (Specific Wear Rate) Resin Akrilik dengan Penambahan Serat Penguat pada Dental Prosthesis*. Jurnal Teknik ITS Vol. 1
- Wiengmoon, A. 2011. *Carbides in High Chromium Cast Irons*. Phitsanulok.
- Zhang, M. 2001. *The Effect of Heat Treatment On The Toughness, Hardness and Microstructure of Low Carbon White Cast Irons*. Australia: Journal of Materials Science.

LAMPIRAN

A. Analisa OES (Optical Emission Spectrometry)

POLITEKNIK PERKAPALAN NEGERI SURABAYA
LABORATORIUM OT NDT

OES Chemical Results

Sample ID : A Material : CARBON STEEL
Customer : ZAHRA LUTHFIAH S / ITS Dimension : 20X20X20 mm
Lab-no. : LAB. UJI BAHAN Heat-no. : -
Operator : AGUS Ka. Laboratorium : M. THORIQ W.
Date: 9/12/2017

Spektralanalyse Foundry-MASTER Grade :

	Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
1	76.1	1.71	0.888	0.674	0.0350	0.0101	16.7	0.811
2	75.9	1.69	0.837	0.688	0.0375	0.0176	16.9	0.813
3	76.0	1.68	0.817	0.667	0.0372	0.0080	16.9	0.810
Ave	76.0	1.70	0.847	0.677	0.0366	0.0119	16.8	0.811

	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti	V	W
1	0.463	< 0.0005	0.0391	0.0902	0.793	0.0030	0.0308	1.48
2	0.494	< 0.0005	0.0389	0.0975	0.772	0.0021	0.0341	1.46
3	0.497	< 0.0005	0.0383	0.0975	0.809	0.0035	0.0319	1.48
Ave	0.485	< 0.0005	0.0388	0.0951	0.791	0.0029	0.0323	1.47

	Sn
1	0.0087
2	0.0108
3	0.0086
Ave	0.0087

B. Standar Komposisi ASTM A532

TABLE 1 Chemical Requirements, Weight %

Class	Type	Designation	Carbon	Manganese	Silicon	Nickel	Chromium	Molybdenum	Copper	Phosphorus	Sulfur
I	A	Ni-Cr-Hc	2.8–3.6	2.0 max	0.8 max	3.3–5.0	1.4–4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	B	Ni-Cr-Lc	2.4–3.0	2.0 max	0.8 max	3.3–5.0	1.4–4.0	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	C	Ni-Cr-GB	2.5–3.7	2.0 max	0.8 max	4.0 max	1.0–2.5	1.0 max	...	0.3 max	0.15 max
I	D	Ni-HfCr	2.5–3.6	2.0 max	2.0 max	4.5–7.0	7.0–11.0	1.5 max	...	0.10 max	0.15 max
II	A	12 % Cr	2.0–3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	11.0–14.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	B	15 % Cr-Mo	2.0–3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	14.0–18.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
II	D	20 % Cr-Mo	2.0–3.3	2.0 max	1.0–2.2	2.5 max	18.0–23.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max
III	A	25 % Cr	2.0–3.3	2.0 max	1.5 max	2.5 max	23.0–30.0	3.0 max	1.2 max	0.10 max	0.06 max

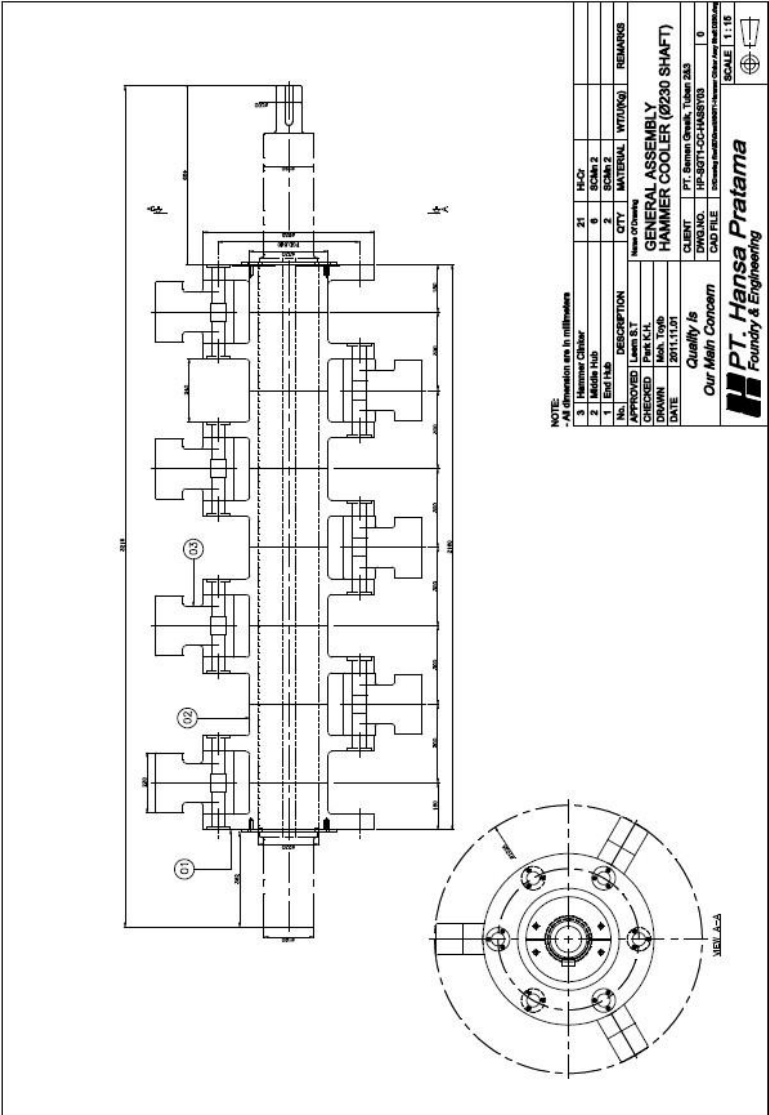
C. Standar Kekerasan ASTM A532

TABLE 2 Hardness Requirements

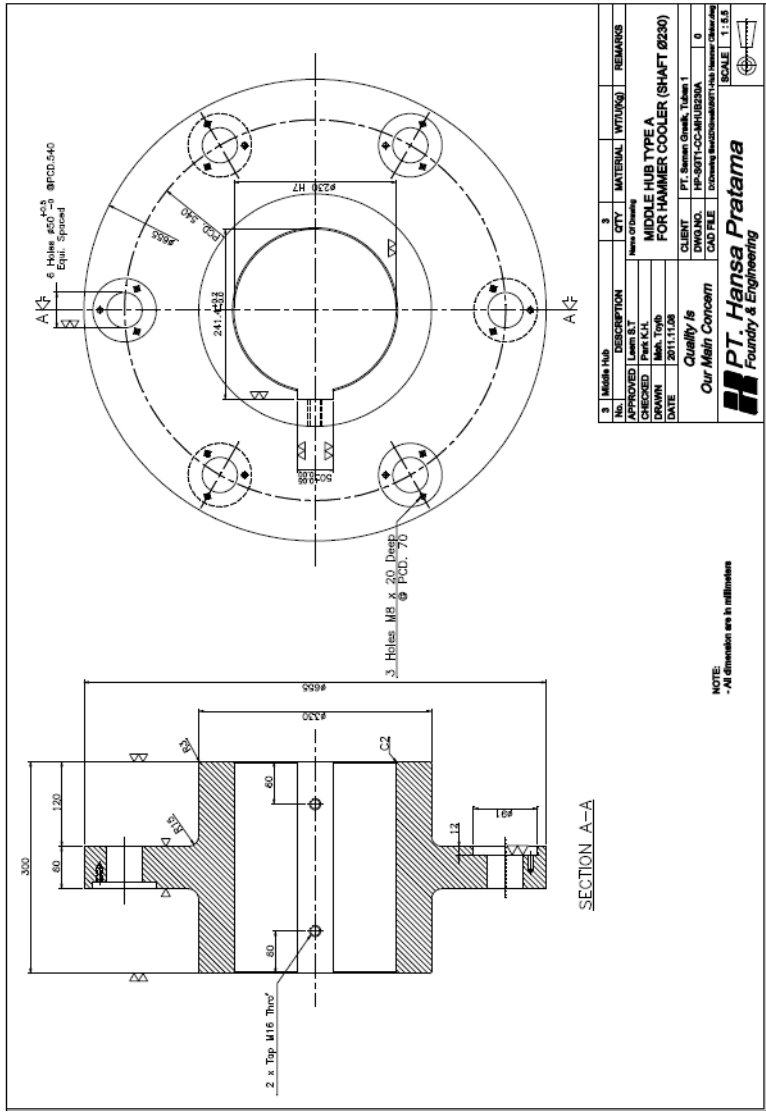
Class	Type	Designation	Hardness Value-HB																		Typical Section Thickness					
			As Cast or As Cast and Stress Relieved						Sand Cast, min ^a						Hardened or Hardened and Stress Relieved											
			Level 1						Level 2						Chill Cast, min ^a						Softened, max					
			HB	HRC	HV	HB	HRC	HV	HB	HRC	HV	HB	HRC	HV	HB	HRC	HV	HB	HRC	HV						
I	A	Ni-Cr-HfC	550	53	600	600	56	660	650	59	715	600	56	660	...	...	...	...	...	...
I	B	Ni-Cr-LoC	550	53	600	600	56	660	650	59	715	600	56	660	...	...	...	...	...	...
I	C	Ni-Cr-GB	550	53	600	600	56	660	650	59	715	600	56	660	400	41	430	...	...	...			
I	D	Ni-HfCr	500	50	540	600	56	660	650	59	715	550	53	600	...	...	...	...	...	...
II	A	12 % Cr	500	53	600	600	56	660	650	59	715	550	53	600	400	41	430	...	...	...			
II	B	20 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59	715	400	41	430	...	...	...	...	...	...
II	D	20 % Cr-Mo	450	46	485	600	56	660	650	59	715	...	...	...	400	41	430	...	...	...			
III	A	25 % Cr	450	46	485	600	56	660	650	59	715	...	...	...	400	41	430	...	...	...			

D. Lampiran Gambar Desain

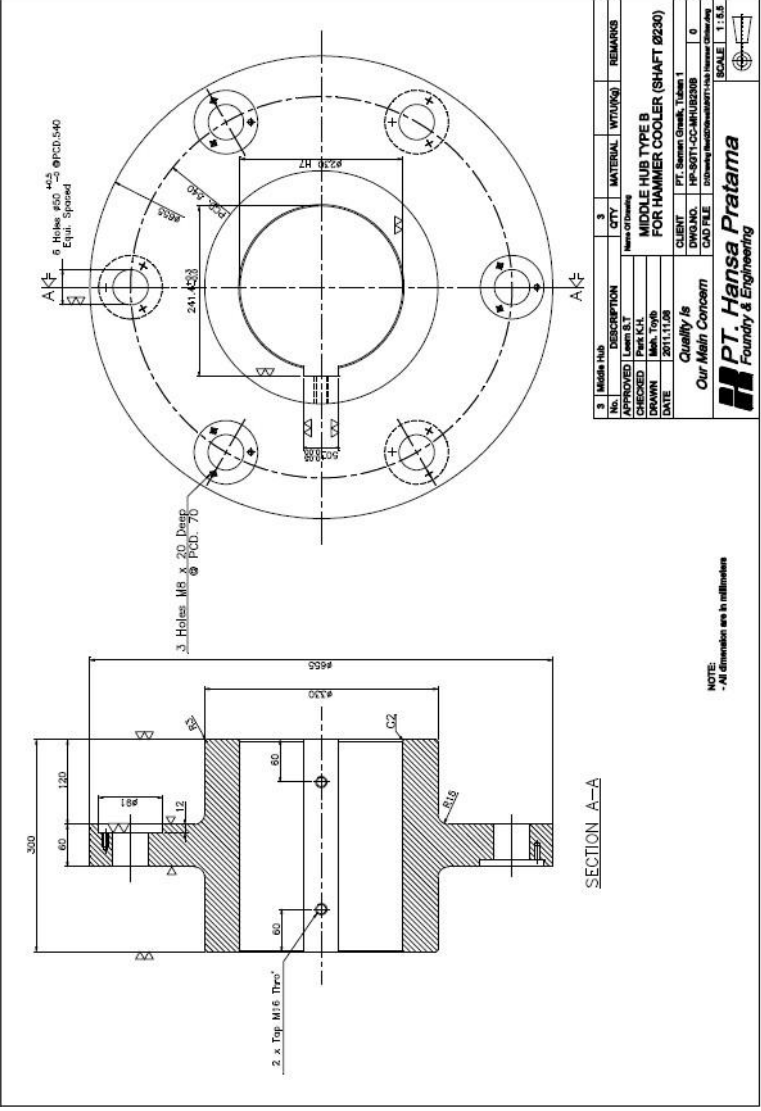
1. Gambar Desain *Hammer Crusher Assembly*



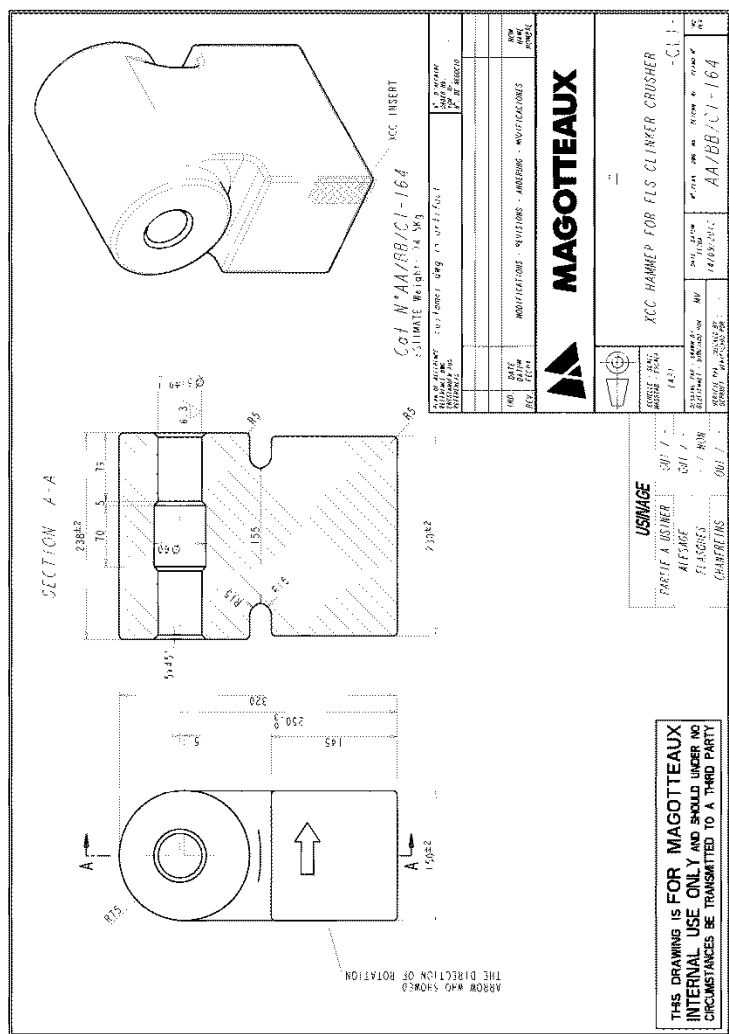
2. Gambar Desain Sambungan Tengah Type A Hammer Crusher



3. Gambar Desain Sambungan Tengah Type B Hammer Crusher



xxiv



E. Uji Kekerasan

Kode Spesimen	Nilai Kekerasan (HVN)					Rata-Rata (HVN)	Standar Deviasi
	t1	t2	t3	t4	t5		
AC	622	629	614	617	622	620.80	5.72
AQ	673	686	683	680	670	678.40	6.73
A1	706	693	690	696	713	699.60	9.61
A2	704	694	696	683	685	692.40	8.56
B1	660	670	658	663	683	666.80	10.13
B2	658	660	653	645	670	657.20	9.20
C1	665	648	656	648	654	654.20	7.01
C2	659	636	639	648	646	645.60	8.96

F. Uji Keausan

Kode Spesimen	Tebal Spesimen (mm)				Rata-rata (mm)	Selisih (mm)	Laju Keausan (mm/jam)	Standar Deviasi
	T0	T'1	T'2	T'3				
AC	11	10.8	10.9	10.75	10.817	0.183	3.67	0.076
AQ	10.8	10.65	10.7	10.7	10.683	0.117	2.33	0.029
A1	11	10.9	10.95	10.9	10.917	0.083	1.67	0.029
A2	10.8	10.7	10.7	10.7	10.700	0.100	2.00	0.050
B1	10.9	10.75	10.8	10.8	10.783	0.117	2.33	0.029
B2	10.9	10.8	10.8	10.7	10.767	0.133	2.67	0.058
C1	11	10.85	10.85	10.85	10.850	0.150	3.00	0.075
C2	10.9	10.7	10.7	10.8	10.733	0.167	3.33	0.058

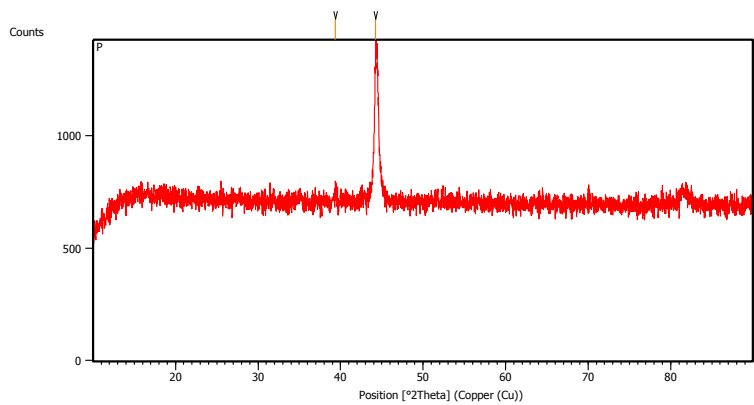
G. Uji XRD

1. Spesimen AQ

Measurement Conditions:

Dataset Name	P
File name	E:\DATA PENGUJIAN\Pengujian
2017\Desember\Zahra\P\P.rd	
Comment	Configuration=Reflection-
Transmission Sp	Goniometer=PW3050/60
(Theta/Theta); Mini	
Measurement Date / Time	12/28/2017 3:45:00 PM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	10.0084
End Position [°2Th.]	89.9764
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2500
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractionmeter Type	XPert MPD
Diffractionmeter Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

Main Graphics, Analyze View:



Peak List:

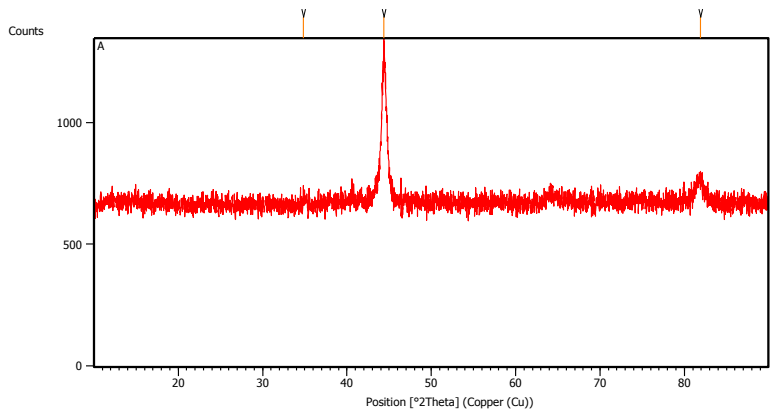
Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
39.3355	38.68	0.4015	2.29060	6.50
44.2448	595.15	0.2342	2.04717	100.00

2. Spesimen A1

Measurement Conditions:

Dataset Name	A
File name	E:\DATA PENGUJIAN\Pengujian
2017\Desember\Zahra\A\A.rd	
Comment	Configuration=Reflection-
Transmission Sp	Goniometer=PW 3050/60
(Theta/Theta); Mini	
Measurement Date / Time	12/28/2017 3:36:00 PM
Raw Data Origin	PHILIPS-binary (scan) (.RD)
Scan Axis	Gonio
Start Position [°2Th.]	10.0084
End Position [°2Th.]	89.9764
Step Size [°2Th.]	0.0170
Scan Step Time [s]	10.1500
Scan Type	Continuous
Offset [°2Th.]	0.0000
Divergence Slit Type	Fixed
Divergence Slit Size [°]	0.2500
Specimen Length [mm]	10.00
Receiving Slit Size [mm]	12.7500
Measurement Temperature [°C]	-273.15
Anode Material	Cu
K-Alpha1 [Å]	1.54060
K-Alpha2 [Å]	1.54443
K-Beta [Å]	1.39225
K-A2 / K-A1 Ratio	0.50000
Generator Settings	30 mA, 40 kV
Diffractionmeter Type	XPert MPD
Diffractionmeter Number	1
Goniometer Radius [mm]	200.00
Dist. Focus-Diverg. Slit [mm]	91.00
Incident Beam Monochromator	No
Spinning	No

Main Graphics, Analyze View:



Peak List:

Pos. [°2Th.]	Height [cts]	FWHM Left [°2Th.]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
34.8239	25.24	0.8029	2.57632	4.18
44.3867	603.79	0.1673	2.04096	100.00
81.9163	94.75	0.6691	1.17609	15.69

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada pengerjaan tugas akhir ini penulis banyak mendapat bantuan dari berbagai pihak, pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Allah SWT karena dengan rahmat dan kuasa-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan baik dan tepat waktu.
2. Ayah, Ibu, Kakak, Adik, serta seluruh keluarga yang telah memberikan banyak doa, dukungan, semangat, cinta kasih, motivasi, dan inspirasi, serta dukungan dana dalam mengerjakan tugas akhir dan selama berkuliah di JTMM FTI-ITS.
3. Ir. Rochman Rochiem., M.Sc. dan Dian Mughni Felicia S.T., M.Sc. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta S.T., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Mas Irfan P. H. S.T., M.Sc., PhD. selaku dosen wali yang sangat mengayomi selama penulis menjalani pendidikan di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi.
7. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS yang telah membimbing penulis hingga terciptanya laporan ini.
8. Prita Meilyvia Devalini dan Pandu Aditya Putra selaku sahabat yang selalu ada kapanpun dan dimanapun, sebagai temen maen, temen makan, temen jalan, temen midnight drive, temen karaoke, temen eug dah pokonya.
9. Para Sarjana Toidi dan Calon Sarjana Toidi, Taufik Ramadhanu, Reza Fauzan Permadi, Dwiki Pratama Putra, Pandu Aditya Putra, Rifki Lufthansa, M. Noer Iskandar, Feisha Fadila Rifki, Emral Arsyanjani, M. Afiq Ihsan, M.

- Irfan Bibra, M. Ikhwan Rahman, Sipartogi Silalahi, Ilham Nurrirofiq, dan Hafizhul Islam yang telah memberikan semangat dan energi positif selama penulis menjadi mahasiswa di JTMM FTI-ITS.
10. Segenap Direksi PT. Semen Indonesia Cabang Lab. Metal, yaitu Pandu, Rifki, Zahra, Adnan, dan Redy yang telah menjadi partner TA termantap yang pernah ada.
 11. Teman-teman Pejuang Laboratorium Metalurgi yang telah berjuang bersama dalam menyelesaikan tugas akhir.
 12. Teman-teman dari Hublu HMMT FTI-ITS 15/16, Hublu HMMT FTI-ITS 16/17, PM3I 2016 dan 2017, Public Relation and Communication Department SPE ITS SC 16/17, dan NACE SC ITS 16/17 yang telah bekerja sama dengan penulis didalam organisasi dengan sangat baik dan meyenangkan.
 13. Pria-pria baik yaitu Rakha, Topik, Ahlan, Andre, Sebas, dan Mujay yang telah mendukung dan menghibur penulis dari jauh.
 14. Erick, Syatrio, Mita, Yoso, dan teman-teman seperantauan ITS lainnya yang telah mengisi hari-hari penulis dari jaman maba.
 15. Aset MT 16 yang telah membantu penulis dalam menjalani masa perkuliahan dan telah menjadi motor angkatan bagi saya dan teman-teman MT16 lainnya.
 16. Teman-teman seperjuangan MT16 yang memberikan banyak warna dan cerita dalam kehidupan penulis.
 17. Dan Seluruh pihak yang telah memberikan partisipasi dalam Tugas Akhir ini.
 18. Serta seluruh pihak yang belum bisa dituliskan satu per satu oleh penulis. Terimakasih atas dukungan dan bantuan teman-teman sekalian.

BIODATA PENULIS



Argyabrata, atau yang lebih akrab disapa Argya lahir di Jakarta pada tanggal 13 Mei 1996. Penulis menempuh pendidikan dasar di SDN KDW 01 Pagi. Kemudian dilanjutkan ke jenjang pertama di SMPN 49 Jakarta. Selanjutnya dilanjutkan ke jenjang atas di SMAN 39 Jakarta. Lalu penulis melanjutkan pendidikan ke perguruan tinggi negeri yaitu di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.

Selama penulis menempuh perkuliahan, penulis juga tercatat aktif di berbagai acara departemen maupun institusi. Penulis pernah menjadi panitia di acara yg diadakan fakultas maupun institusi baik dalam skala nasional maupun internasional seperti Gerigi ITS 2015, Petrofest 2016, Petrolida 2016-2017, dan juga International Conference on Material and Metallurgical Engineering (ICOMMET 2015 & 2017). Penulis juga tercatat sebagai *Head of Publication and Design Department National Association of Corrosion Engineers (NACE) SC-ITS* 2016/2017. Selain itu, penulis juga pernah menjabat sebagai Wakil Sekertaris Jenderal Perhimpunan Mahasiswa Metalurgi dan Material se-Indonesia (PM3I) 2017/2018.

Penulis memiliki pengalaman kerja praktek di PT. ANTAM (PERSERO) UBPP Logam Mulia, Jakarta pada bulan Januari-Februari 2017 dan memiliki topik selama kerja praktek dengan judul “Studi Literatur Proses *Refinery Precious Group Metals (PGM) Johnson Matthey* dan *Anglo American*”. Selain itu, penulis juga pernah melakukan magang di PT. GMF Aeroasia, Tangerang pada bulan Juli-Agustus 2017.

Tugas akhir yang diambil penulis yaitu pada bidang Korosi dan Analisis Kegagalan dengan judul “Analisis Pengaruh Variasi Temperatur dan Waktu Tahan *Tempering* pada Proses *Hardening* terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Material *Hammer Crusher*.”.